# СОДЕРЖАНИЕ

**Том 58, вып. 2, 2022**

## ОБЗОРЫ

Компонентный состав и биологическая активность олео-камедной смолы *Boswellia serrata* (Burseraceae)

*М. О. Черепанова, М. А. Суботялов* 111

## СТАТЬИ И СООБЩЕНИЯ

### Ресурсы полезных растений и растительных сообществ

Состояние ценопопуляций тиса остроконечного *Taxus cuspidata* (Taxaceae) в национальном парке “Удэгейская легенда” (Приморский край)

*Г. А. Гладкова, Л. А. Сибирина* 124

### Биология ресурсных видов

Семенная продуктивность *Caltha palustris* (Ranunculaceae) *in situ* и *ex situ* на участках Центрального сибирского ботанического сада

*Т. И. Фомина* 135

### Интродукция ресурсных видов

Рост и развитие *Vaccinium angustifolium* (Ericaceae) при интродукции в условиях Удмуртии

*Д. А. Зорин, А. В. Федоров* 144

### Компонентный состав ресурсных видов

Компонентный состав растений *Erodium stephanianum* (Geraniaceae), произрастающих в Республике Бурятия

*Л. П. Ильина, Д. Н. Оленников, Т. П. Анцупова* 152

Тритерпеноиды соцветий *Synurus deltoides* (Asteraceae) в Приморском крае

*А. В. Мягчилов* 161

Особенности содержания химических элементов в хвое *Pinus pumila* (Pinaceae) на хребте Удокан (Забайкальский край)

*В. П. Макаров, С. В. Борзенко, Н. В. Помазкова, Т. В. Желибо* 165

Флавоноиды корней *Limonium suffruticosum* и *L. Caspium* (Plumbaginaceae) из флоры Азербайджана

*И. С. Мовсумов, Э. Э. Гараев, Г. Хербет, Э. А. Гараев, Т. А. Сулейманов* 176

### Антропогенное воздействие на растительные ресурсы

Сравнительная реакция сеянцев *Betula pubescens* (Betulaceae) на высокие концентрации Cu, Ni и Cd в субстрате в условиях песчаной культуры

*И. В. Дроздова, И. Б. Калимова, Н. В. Алексеева-Попова, А. И. Беляева* 179

### Методика исследований

Подходы к определению фитомассы напочвенного покрова в лесу (обзор методов)

*Л. С. Ермолова* 197

# Contents

**Vol. 58, issue 2, 2022**


## REVIEW

Component Composition and Biological Activity of Oleo-Gum Resin from *Boswellia serrata* (Burseraceae)
*M. O. Cherepanova, M. A. Subotyalov* 111

## ARTICLES AND COMMUNICATIONS
### Resources of Useful Plants and Plant Assosiations

The State of *Taxus cuspidata* (Taxaceae) Coenopopulations in Udege Legend National Park (Primorye Territory)
*G. A. Gladkova, L. A. Sibirina* 124

### Biology of Resource Species

Seed Productivity of *Caltha palustris* (Ranunculaceae) *in situ* and *ex situ* at the Plots of the Central Siberian Botanical Garden
*T. I. Fomina* 135

### Introduction of Resourse Species

Growth and Development of *Vaccinium angustifolium* (Ericaceae) under Introduction in Udmurtia
*D. A. Zorin, A. V. Fedorov* 144

### Component Composition of Resource Species

Component Composition of *Erodium stephanianum* (Geraniaceae) Found in the Republic of Buryatia
*L. P. Ilyina, D. N. Olennikov, T. P. Antsupova* 152

Triterpenoids in Inflorescences of *Synurus deltoides* (Asteraceae)
*A. V. Myagchilov* 161

Some Aspects of the Chemical Elements Content in the Needles of *Pinus pumila* (Pinaceae) from the Udokan Ridge (Transbaikalia)
*V. P. Makarov, S. V. Borzenko, N. V. Pomazkova, T. V. Zhelibo* 165

Flavonoids from the Roots of *Limonium suffruticosum* and *L. caspium* (Plumbaginaceae) of Azerbaijan
*I. S. Movsumov, E. E. Garayev, G. Herbette, E. A. Garaev, T. A. Suleymanov* 176

### Anthropogenic Influence on Plant Resouces

Comparative Response to High Cu, Ni, and Cd Concentrations of *Betula pubescens* Seedlings (Betulaceae) in Sand Culture
*I. V. Drozdova, I. B. Kalimova, N. V. Alekseeva-Popova, A. I. Belyaeva* 179

### Methods of Research

Approaches to the Assessment of the Forest Herbaceous Layer Phytomass (Methods Review)
*L. S. Ermolova* 197

**EDN:** TTJBHE
*РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, 2022, том 58, вып. 2, с. 111–123*

**ОБЗОРЫ**

# КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ОЛЕО-КАМЕДНОЙ СМОЛЫ *BOSWELLIA SERRATA* (BURSERACEAE)

**© 2022 г. М. О. Черепанова[1], М. А. Суботялов[1, 2, *]**

[1]*Новосибирский государственный педагогический университет, г. Новосибирск, Россия*
[2]*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*
**e-mail: subotyalov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 01.04.2021 г.
После доработки 17.02.2022 г.
Принята к публикации 03.03.2022 г.

В обзоре представлен анализ публикаций по выявлению биологически активных веществ и фармакологического потенциала различных компонентов олео-камедной смолы растения *Boswellia serrata* Roxb. ex Colebr., также известного как индийский ладан. Проведенный анализ показал, что в составе олео-камедной смолы босвеллии присутствует широкий набор биологически активных веществ, принадлежащих к классам моно-, сескви-, ди- и тритерпенов. В многочисленных исследованиях *in vivo* и *in vitro* были продемонстрированы их противовоспалительные и антипролиферативные эффекты. Наибольшую противовоспалительную активность проявили босвеллиевые кислоты, принадлежащие к классам тетра- и пентациклических тритерпеноидов. Обзор показал, что смола ладана, издавна применяемая в традиционной медицине Аюрведы и Унани, может быть перспективным видом сырья для разработки средств, эффективных при заболеваниях опорно-двигательного аппарата.

*Ключевые слова: Boswellia serrata*, босвеллиевые кислоты, терпены, эфирное масло, олео-камедь-смола, остеоартрит, хроническое воспаление

**DOI:** 10.31857/S0033994622020030

Лечение остеоартрита (ОА) – весьма актуальная проблема для современного общества и медицинской науки. Симптомы ОА включают в себя хроническую боль в области пораженного сустава и ограничение подвижности, что в свою очередь вызывает страдания больного, и зачастую приводит к инвалидности [1]. У пациентов с ОА наблюдается высокий риск развития кардиоваскулярных заболеваний, сокращение продолжительности жизни, а также снижение ее качества [2].

Воспаление является центральным звеном патогенеза ОА [3, 4], а основу базисной фармакотерапии составляют противовоспалительные препараты, в частности нестероидные противовоспалительные средства (НПВС). Значительную трудность для лечащих врачей представляет наличие сопутствующих хронических заболеваний у пожилых пациентов, таких как патология желудочно-кишечного тракта, артериальная гипертензия, ишемическая болезнь сердца, сахарный диабет, метаболический синдром, бронхиальная астма и другие [5]. До сих пор остается актуальным поиск новых препаратов, обладающих обезболивающим, противовоспалительным и хондропротекторным действием. Поэтому необходимо искать новые возможности комплексной терапии, включающей применение препаратов на основе растительного сырья. Введение в практику более безопасных препаратов растительного происхождения с широким спектром лечебных свойств позволит снизить дозировки НПВС и усилить их эффект за счет синергичного действия активных веществ растений. Одним из самых перспективных растений с богатым набором веществ, обладающих противовоспалительной активностью, является *Boswellia serrata*.

Босвеллия пильчатая *Boswellia serrata* Roxb. ex Colebr. (род: *Boswellia*, сем. Burseraceae) – листопадное дерево среднего и крупного размера до 18 м в высоту и до 2.4 м в обхвате (обычно 1.5 м). Встречается в Западной Азии, Омане, Йемене, Южной Африке, Южной Аравии и во многих регионах Индии (западные Гималаи, Раджастхан, Гуджарат, Махараштра, Мадхья-Прадеш, Бихар, Орисса) [6]. Другие названия – индийский ладан, шаллаки. Плод треугольный, компактный, односемянный. В год взрослое растение дает около 1–1.5 кг желтовато-зеленой камедь-смолы, известной как ладан или олибанум, которая является источником биологически активных веществ [7].

Чистая олео-камедь-смола, собранная в оптимальное время года, медленно затвердевает, сохраняя свой золотистый цвет и прозрачность. Смолу обычно собирают в течение всего лета и осени после того, как дерево было ранено в марте или апреле. Босвеллия может производить экссудаты хорошего качества только в течение трех лет. После этого периода качество собранной смолы значительно снижается. Поэтому дерево следует оставить отдыхать в течение нескольких лет после сбора урожая [8].

### *Применение в традиционной медицине*

*B. serrata* – одно из наиболее ценных растений в традиционных системах медицины, история применения которого уходит далеко в глубь веков. Олео-камедная смола некоторых видов *Boswellia*, таких как *B. serrata* и *B. carterii* использовалась как компонент препаратов в Аюрведе и Унани [9]. Тексты традиционной аюрведической медицины описывают противоревматическую (противоартритную) активность камеде-смол *B. serrata*. Помимо этого, олео-камедь-смола также упоминается в традиционных аюрведических и унанийских (персидско-арабских) текстах как эффективное средство от диареи, дизентерии, стригущего лишая, фурункулов, лихорадок (жаропонижающее), заболеваний кожи и крови, сердечно-сосудистых заболеваний, заболеваний полости рта и горла, бронхита, астмы, кашля, вагинальных выделений, выпадения волос, желтухи, геморроя, сифилитических заболеваний, нерегулярных менструаций. Смола также упоминается как вяжущее, мочегонное и стимулирующее функцию печени средство [10].

Сегодня индийский ладан используют во многих странах для лечения ревматических и других воспалительных заболеваний, включая болезнь Крона и язвенный колит, хотя имеются сообщения о незначительной эффективности *B. serrata* при рецидивирующих заболеваниях. В ряде исследований сообщалось о противоопухолевой, противовоспалительной, иммуномодулирующей, антимикробной, противовирусной и противодиабетической активности извлечений из некоторых видов босвеллии [11].

### *Биологически активные вещества B. serrata*

Проведенный анализ показал, что в различных компонентах *B. serrata* (масле, камеди и смоле) содержится широкий спектр биологически активных веществ (БАВ), таких как моно-, сескви-, ди- и тритерпены, пента- и тетрациклические тритерпеновые кислоты [8–11, 26]. Фитохимический состав олео-камедь-смолы *B. serrata* зависит от ботанического происхождения [8] и содержит 30–60% смолы, 5–10% эфирных масел, растворимых в органических растворителях. Остальная часть приходится на моносахариды (~65% арабинозы, галактозы, ксилозы), растворимые в воде. Смолы имеют приятный аромат из-за присутствия эфирных масел, что объясняет их коммерческое значение [10].

Гидродистиллят *B. serrata* представляет собой бесцветное масло. В его состав входят моно-, сескви- и дитерпены. Монотерпены представлены α-туйеном (12.0%), α-пиненом (8.0%), сабиненом (2.2%), β-пиненом (0.7%), мирценом (3.8%), α-фелландреном (1.0%), р-цименом (1.0%), лимоненом (1.9%), линалоолом (0.9%), перилленом (0.5%) [11]. Монотерпены составляют более 80% состава эфирных масел и представляют особый класс терпенов, состоящий из двух изопреновых звеньев с молекулярной формулой $C_{10}H_{16}$ [12]. Как известно, они проявляют несколько видов биологической активности. Среди них противовоспалительная, антиоксидантная, антибактериальная, противогрибковая, противоопухолевая, обезболивающая, гастро- и нейропротекторная, анксиолитическая и противовирусная [12–24].

Среди сесквитерпенов (15C) были выявлены гермакрен D (2.0%) и кессан (0.9%). Класс дитерпенов включает цембрен (0.5%) и цембренол (1.9%). Кроме того, из эфирного масла *B. serrata* были выделены и идентифицированы монотерпен 5,5-диметил-1-винилбициклогексан (2.0%) и два дитерпеноидных компонента – м-камфорен (0.7%) и п-камфорен (0.3%) [11].

Сравнительный анализ состава эфирного масла листьев и олео-камедной смолы показал, что процентное содержание большинства монотерпенов в листьях значительно больше, чем в ладане. Так п-цимола в листьях – 2.2% против 1.0% в ладане, лимонена – 3.9% против 1.9%, α-туйена – 32.0% против 12.0%, α-фелландрена – 5.6% против 1.0%. Но для двух веществ справедливо обратное соотношение в листьях и смоле: α-пинена и метилхавикола в листьях соответственно 2.5 и 5.0%, а в живице – 8.0 и 11.6% [11, 14]. Основным компонентом эфирного масла камедь-смолы *B. serrata* был α-пинен, составляющий примерно 45% [11], в то время как в листьях основным веществом является α-туйен (32%) [14] (табл. 1).

Содержание водорастворимой камеди в олео-камедь-смоле составляет 21–22% (полисахаридная фракция). Четыре различных типа протеогликанов и гликопротеинов были идентифицированы в продуктах олео-камедь-смолы. Основными компонентами (32–56%) водорастворимых поли-

**Таблица 1.** Компонентный состав олео-камедной смолы *Boswellia serrata*
**Table 1.** Component composition of oleo-gum resin from *Boswellia serrata*

| Растительная субстанция<br>Plant substance | Класс химических соединений<br>Class of chemical compounds | Компонент<br>Compound | Содержание, %<br>Content, % | Биологическая активность<br>Biological activity | Ссылки<br>References |
|---|---|---|---|---|---|
| Эфирное масло (5–9%)<br>Essential oil (5–9%) | Монотерпены<br>Monoterpenes | α-Пинен<br>α-Pinene | 8.0 | Антибактериальная, противовоспалительная, антикоагулянтная, антипролиферативная, гастропротекторная, анксиолитическая, антиоксидантная, антипротозойная, нейропротекторная<br>Antibacterial, anti-inflammatory, anticoagulant, antiproliferative, gastroprotective, anxiolytic, antioxidant, antiprotozoal, neuroprotective | 11, 15 |
| | | Сабинен<br>Sabinene | 2.2 | Противогрибковая, противовоспалительная, антиоксидантная<br>Antifungal, anti-inflammatory, antioxidant | 11, 16 |
| | | β-Пинен<br>β-Pinene | 0.7 | Антибактериальная, антипролиферативная, гастропротекторная<br>Antibacterial, antiproliferative, gastroprotective | 11, 15 |
| | | Мирцен<br>Myrcene | 3.8 | Противовоспалительная, антиоксидантная<br>Anti-inflammatory, antioxidant | 11, 21 |
| | | α-Фелландрен<br>α-Phellandrene | 1.0 | Противовоспалительная, антиоксидантная, противоопухолевая, антиноцептивная<br>Anti-inflammatory, antioxidant, antitumor, antinoceptive | 11, 17 |
| | | п-Цимол<br>p-Cymene | 1.0 | Противовоспалительная, антиноцептивная, иммуномодулирующая, антиоксидантная<br>Anti-inflammatory, antinoceptive, immunomodulatory, antioxidant | 11, 18 |
| | | Лимонен<br>Limonene | 1.9 | Противовоспалительная, антибактериальная, противовирусная, антипролиферативная, противогрибковая, антиоксидантная<br>Anti-inflammatory, antibacterial, antiviral, antiproliferative, antifungal, antioxidant | 11, 19 |
| | | Линалоол<br>Linalool | 0.9 | Противовоспалительная, антиоксидантная, противоопухолевая, антигиперлипидемическая, антибактериальная, противогрибковая, антиноцептивная, анксиолитическая<br>Anti-inflammatory, antioxidant, antitumor, antihyperlipidemic, antibacterial, antifungal, antinoceptive, anxiolytic | 11, 12 |
| | | Метилхавикол (эстрагол)<br>Methylchavicol (estragole) | 11.6 | Антибактериальная, антиоксидантная, анксиолитическая, противовоспалительная, релаксирующая<br>Antibacterial, antioxidant, anxiolytic, anti-inflammatory, relaxant | 11, 20 |
| | Сесквитерпены<br>Sesquiterpenes | Метилэвгенол<br>Methyleugenol | 2.1 | Противовоспалительная, антиоксидантная, антибактериальная<br>Anti-inflammatory, antioxidant, antibacterial | 11, 13 |

**Таблица 1.** Окончание

| Растительная субстанция Plant substance | Класс химических соединений Class of chemical compounds | Компонент Compound | Содержание, % Content, % | Биологическая активность Biological activity | Ссылки References |
|---|---|---|---|---|---|
| Смола (65–85%) Resin(65–85%) | Тетрациклические тритерпеновыекислоты Tetracyclic triterpenic acid | 3-Оксо-тирукалловая кислота 3-Oxo-tirucallic acid | – | Иммуномодулирующая, антибактериальная, противоопухолевая, антигиперлипидемическая Immunomodulatory, antibacterial, antitumor, antihyperlipidemic | 6, 11 |
| | | 3-Ацетокси-тирукалловая кислота 3-Acetoxy-tirucallicacid | – | Антипролиферативная Antiproliferative | 6, 11, 22, 37 |
| | | 3-Гидрокситирукалловая кислота 3-Hydroxytirucallic acid | – | Иммуномодулирующая Immunomodulatory | 6, 11, 37 |
| | Пентациклические тритерпеноиды Pentacyclic triterpenoids | β-Босвеллиевая кислота β-Boswellic acid (β-A) | 18.9 | Противовоспалительная, иммуномодулирующая, антибактериальная, антигиперлипидемическая Anti-inflammatory, immunomodulatory, antibacterial, antihyperlipidemic | 10, 11, 25,26 |
| | | Ацетил-β-босвеллиевая кислота Acetyl-β-boswellic acid (ABA) | 11.9 | Противовоспалительная, иммуномодулирующая, антигиперлипидемическая Anti-inflammatory, immunomodulatory, antihyperlipidemic | 10, 11, 25, 26 |
| | | 11-Кето-β-босвеллиевая кислота 11-Keto-β-boswellic acid (KBA) | 3.8 | Противовоспалительная, иммуномодулирующая, антигиперлипидемическая Anti-inflammatory, immunomodulatory, antihyperlipidemic | 8, 10, 11, 25–27 |
| | | Ацетил-11-кето-β-босвеллиевая кислота Acetyl-11-keto-β-boswellicacid (AKBA) | 3.9 | Противовоспалительная, иммуномодулирующая, антибактериальная, противоопухолевая, антигиперлипидемическая Anti-inflammatory, immunomodulatory, antibacterial, antitumor, antihyperlipidemic | 8, 10, 11, 25–27 |
| | | Лупеоловая кислота Lupeolic acid | – | Противоопухолевая Antitumor | 8, 26 |
| | | Ацетил лупеоловая кислота Acetyl-lupeolicacid | – | Противоопухолевая Antitumor | 11, 23 |
| | | α - и β-амирины (урсан и олеанан) α- and β-amyrins (ursane and oleanane) | – | Противоопухолевая Antitumor | 10, 24 |

Примечание. – Количественные данные не представлены.
Note. – Quantitative data are not provided.

мерных веществ являются арабиногалактановые белки. В боковых цепях присутствуют уроновые кислоты, глюкуроновая кислота (9 мол. %) и терминальная 4-О-метилглюкуроновая кислота (13–26 мол. %), а также арабиноза (2–14 мол. %). В полимерной группе наблюдается высокое содержание фруктозы, маннозы и глюкозамина, что свидетельствует о наличии гликопротеинов. Углеводная часть нейтральных протеогликанов первой группы состоит в основном из L-арабинозы (около 90 мол. %) и D-галактозы (8 мол. %). В белковой части преобладают аминокислоты гидроксипролин (около 50 мол. %) и серин (около 20 мол. %). Основным отличием камеди *B. carterii* и *B. serrata* является более высокое содержание белков (22%) в камеди *B. serrata* по сравнению с *B. carterii* (6%) [11].

Смолистая часть *B. serrata* содержит монотерпены (α-туйен), дитерпеновый спирт – серратол, тритерпены (такие как α- и β-амирины), пентациклические тритерпеновые кислоты (босвеллиевые кислоты), тетрациклические тритерпеновые кислоты – 3-оксо-тирукалловую, 3-ацето-тирукалловую, 3-гидрокси-тирукалловую [6, 10, 11]. Иммуномодулирующее действие было обнаружено у тритерпеноидов, выделенных из смолы босвеллии, принадлежащих к лупановым, урсановым (α-амирины), олеанановым (β-амирины) и тирукалловым скелетам (босвеллиевые кислоты) [11].

Кроме того, босвеллия содержит лупеоловую и ацетил-лупеоловую кислоты, ацетат инценсола, оксид инценсола и оксид изоинценсола. Однако здесь следует подчеркнуть разницу между компонентным составом двух видов из семейства босвеллиевых. Из данных хромато-масс-спектрометрического анализа следует, что присутствие инценсола, его ацетата и октилацетата типично для вида *B. carterii*, а *B. serrata* показывает пики m-, p-камфорена и цембренола (серратола) [14, 28, 29]. Основными компонентами *B. carterii* являются α-пинен, лимонен и β-кариофиллен. Доминирующим летучим веществом в экстракте *B. serrata* является α-туйен (11.7%) [11].

Высшие терпеноиды составляют основную долю (25–35%) олео-камедь-смолы [9]. Как *B. serrata*, так и *B. carterii* содержит множество различных БАВ, но наиболее активны среди них шесть кислот – α- и β-босвеллиевые кислоты (β-А и α-А), ацетил-α- и β-босвеллиевые кислоты (АВА), 11-кето-β-босвеллиевая кислота (КВА) и 3-О-ацетил-11-кето-β-босвеллиевая кислота (АКВА), которые проявили способность к ингибированию ферментов, участвующих в воспалении [26]. 11-кето-β-босвеллиевую кислоту (КВА) и ацетил-11-кето-β-босвеллиевую кислоту (АКВА) рассматривали в качестве основных активных веществ, и было продемонстрировано несколько механизмов их действия: ингибирование 5-липоксигеназы (5-LO), снижение уровня цитокинов (интерлейкинов и TNF-α), снижение активности системы комплемента и лейкоцитарной эластазы, снижение образования активных форм кислорода и P-селектин-опосредованного рекрутирования лейкоцитов. Однако другие компоненты олео-камедной смолы, такие как β-босвеллиевая кислота, были предложены в качестве противовоспалительных средств, действующих через ингибирование сериновой протеазы катепсина-G и микросомального простагландина E-синтазы [8].

Гуминовые смолы различных видов босвеллии различаются по содержанию босвеллиевой кислоты. В то время как олео-камедь-смола индийского ладана (*B. serrata*) содержит довольно близкие количества КВА (3.0–4.7%) и АКВА (2.2–2.9%), олео-камедь-смола африканского ладана (*B. carterii*) содержит меньше КВА (0.5%), чем АКВА (3.9%) [25, 27].

Биологическая активность и содержание многих изолированных компонентов олео-камедь-смолы была изучена в многочисленных исследованиях [12–24] (табл. 1). Тем не менее фармакологический потенциал большого числа веществ все еще неизвестен. Среди таких веществ α-туйен, периллен, гермакрен Д, кессан, цембрен А, цембренол, м-камфорин, п-камфорин, β-босвеллинол, октилацетат и серратол. Следует подчеркнуть, что содержание определенных веществ в смоле босвеллии зависит от места произрастания и конкретного образца. Исходя из этого данные, полученные в различных исследованиях, значительно расходятся, что делает затруднительным объективную сравнительную оценку содержания БАВ в ладане босвеллии.

### *Фармакологическая активность*

Босвеллиевые кислоты (БК) получают из камедь-смолы представителей рода *Boswellia*. Различные доклинические и клинические исследования показали, что они обладают значительным потенциалом в лечении хронических воспалительных заболеваний, таких как астма, артрит, отек головного мозга, хронические заболевания кишечника, хронический болевой синдром и др. [6, 11, 26, 34–37].

Фармакологическая активность БК обусловлена их способностью вызывать противовоспалительный, антибактериальный, отхаркивающий, анксиолитический, нейропротекторный, обезболивающий, иммуномодулирующий, транквилизирующий, антигиперлипедемический эффекты

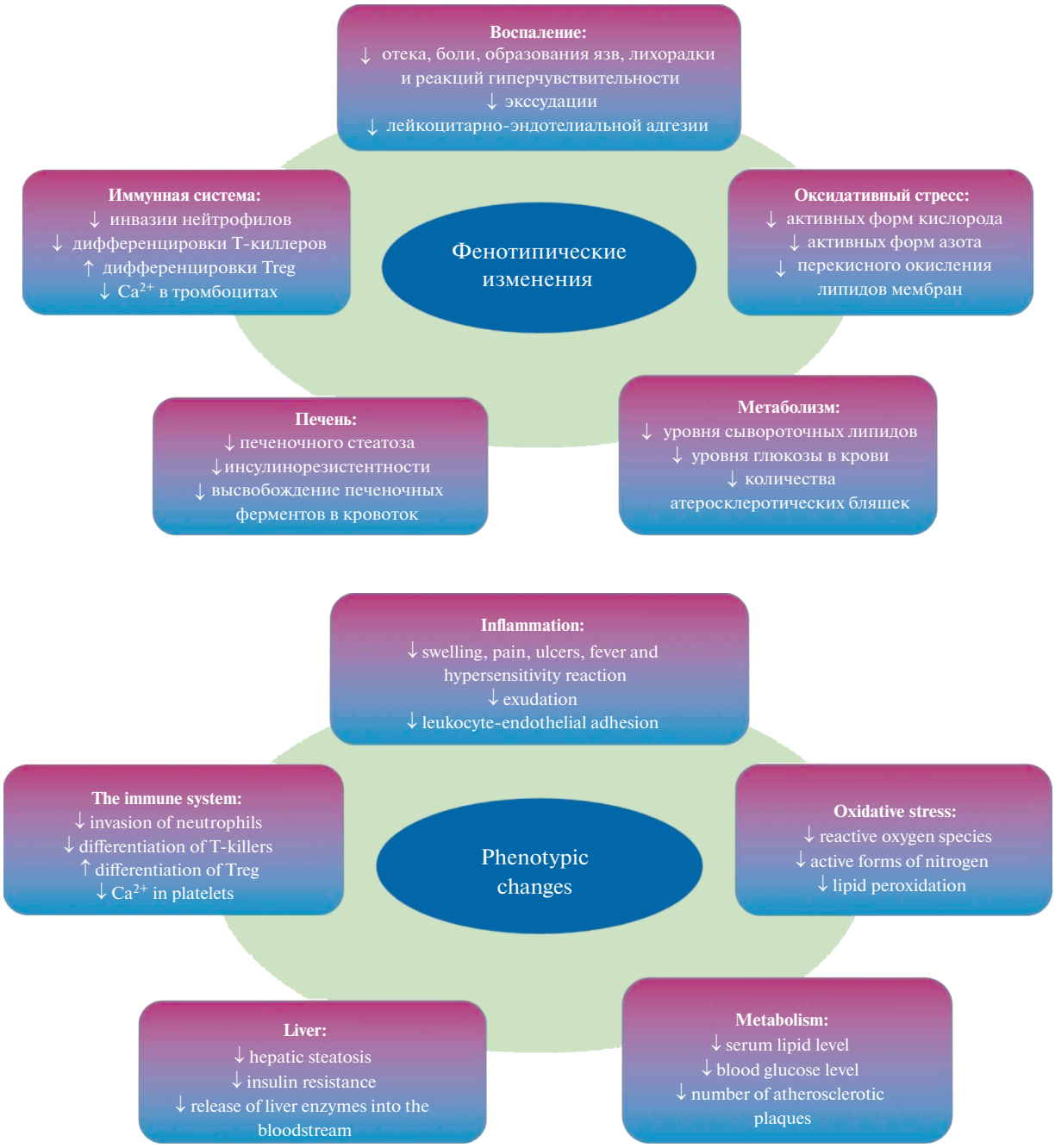



**Рис. 1.** Фенотипические изменения при лечении олибанумом и его ингредиентами.
**Fig. 1.** Phenotypic changes under treatment with frankincense and its ingredients.

и др. [6, 8–11, 26, 30]. Они могут модулировать различные мишени, такие как ферменты, факторы роста, киназы и факторы транскрипции, а также рецепторы, которые позволяют стимулировать апоптоз, остановку клеточного цикла и т. д. Он также может ингибировать различные сигнальные пути, связанные с выживанием клеток, пролиферацией и метастазированием [6, 8–11, 14, 37] (рис. 1).

В течение последних десятилетий многие авторы исследовали механизмы действия экстрактов босвеллии, связанные с воспалительным процессом. Исследования на животных показали, что прием обезжиренного спиртового экстракта

босвеллии снижает полиморфноядерную инфильтрацию и миграцию лейкоцитов, а также первичный синтез антител и приводит к почти полному ингибированию классического пути комплемента [10, 30]. Исследования *in vitro* показали, что группа пентациклических тритерпеноидных соединений и их ацетилированные производные ингибируют биосинтез лейкотриенов – метаболитов арахидиновой кислоты, провоспалительных продуктов 5-липоксигеназы [6]. Кроме того, наблюдали, что AKBA является естественным ингибитором фактора транскрипции NF-κB, присутствие которого является предпосылкой для образования или действия цитокинов и хемокинов, участвующих в воспалительных реакциях [8, 31].

В литературе упоминается, что экстракт босвеллии оказывает как модулирующее, так и ингибирующее действие на иммунную систему дозозависимым образом. Beghelli D. с соавт. [30] обобщили имеющиеся данные и пришли к выводу, что низкие концентрации БК усиливают стимулированную пролиферацию лимфоцитов, тогда как более высокие концентрации ингибируют ее.

Противовоспалительная и противоартритная активность были протестированы на моделях каррагинан-индуцированного и микобактериального адъювантного артрита лапы у крыс. Лечение экстрактом олео-камедь-смолы вызывало уменьшение отека лапы крысы как при пероральном, так и при внутрибрюшинном введении. Противовоспалительный эффект был одинаково хорошо выражен на обеих моделях по сравнению с введением фенилбутазона.

*In vivo* изучено влияние нестероидного противовоспалительного препарата на основе смолы *B. serrata* на метаболизм гликозаминогликанов (ГАГ) у самцов крыс-альбиносов. Эффект БК был сопоставлен с действием кетопрофена. Значительное снижение биосинтеза ГАГ наблюдали у крыс, получавших все эти препараты. Содержание ГАГ было снижено в группе, получавшей кетопрофен, в то время как в группах, получавших БК или смолу содержание ГАГ оставалось неизменным.

Куркумин из *Curcuma longa* L. и камедная смола *B. serrata* были изучены в ряде экспериментов *in vitro* с целью выяснения механизма их противовоспалительного действия. Куркумин ингибировал активность 5-липоксигеназы (5-LO) в перитонеальных нейтрофилах крыс, а также активность 12-липоксигеназы и циклооксигеназы (COX) в тромбоцитах человека. В системе свободного перекисного окисления клеток куркумин проявлял выраженную антиоксидантную активность. БК ингибировали синтез лейкотриенов через 5-LO, но не влияли на активность 12-LO и COX. Кроме того, БК не нарушали перекисное окисление арахидоновой кислоты железом и аскорбатом. Полученные данные свидетельствуют о том, что БК являются специфическими, не редокс-ингибиторами синтеза лейкотриенов, либо непосредственно взаимодействующими с 5-LO, либо блокирующими ее транслокацию.

Среди БК наиболее эффективными являются KBA (11-кето-бета-босвеллиевая кислота) и AKBA (3-O-ацетил-11-кето-бета-босвелловая кислота). Было сообщено, что наличие карбоновой группы и 11-кето-группы имеет решающее значение для ингибирующего влияния на 5-LO – ключевой фермент биосинтеза лейкотриенов [6].

Простагландин PG E2 играет ключевую роль в воспалении и боли, а микросомальная синтаза-1 простагландина E (mPGES1) рассматривается как потенциальная цель для разработки противовоспалительных терапевтических средств. Путь биосинтеза PG E2 включает высвобождение арахидиновой кислоты из мембранных фосфолипидов с последующим преобразованием через COX-1 и -2 в PGH2. Затем происходит его изомеризация в PG E2 синтазами (PGES), которые индуцируются провоспалительными стимулами, такими как интерлейкин-1β (IL-1β) или липополисахарид (LPS). Таким образом, воспаление, боль, лихорадка тесно связаны с повышенным образованием PG E2, происходящим из-за активации mPGES1. В моделях на клетках карциномы легкого человека и каррагенан-индуцированного плеврита у крыс было показано, что БК были прямыми ингибиторами mPGES1, в частности, β-босвеллиевая кислота была высокоэффективной *in vitro* и *in vivo*. Снижение PGE2 является результатом избирательного ингибирования превращения PGH2 в PGE2 путем влияния БК на mPGES1, а не на COX-2 [32].

Недавнее рандомизированное двойное слепое плацебо-контролируемое исследование продемонстрировало, что пероральный прием экстракта (BSE), содержащего AKBA и BA (3-ацетил-11-кето-β-босвеллиевую кислоту и β-босвеллиевую кислоту), значительно улучшал физическую активность у пациентов с диагностированным впервые или нелеченным OA коленного сустава. В общей сложности 48 пациентов с OA коленного сустава были рандомизированы и распределены в группы BSE и плацебо для вмешательства. Пациенты принимали BSE или плацебо в течение 120 дней. Результаты испытаний показали, что лечение BSE значительно улучшило физическое состояние пациентов за счет уменьшения боли и

скованности. Кроме того, рентгенологическая оценка показала, что BSE способствовал увеличению суставной щели и уменьшил образование остеофитов по сравнению с плацебо. Еще одним фактом, подтверждающим клиническую эффективность, было то, что лечение BSE, включающее 30% AKBA и BA, значительно снижало уровень С-реактивного белка по сравнению с группой плацебо [33].

Обзор результатов исследований компонентного состава и биологической активности олеокамедной смолы *Boswellia serrata* показал, что на экспериментальных моделях заболеваний у животных индийский ладан и его активные вещества проявили благотворное воздействие на течение воспалительных заболеваний. Подробные резюме и классификация результатов изложены в литературе [6, 11, 26, 34].

Босвеллиевые кислоты и другие терпены олеокамедной смолы *B. serrata* являются перспективными биологически активными веществами для лечения широкого спектра заболеваний – в первую очередь воспалительных. Высокая противовоспалительная активность босвеллиесых кислот доказана как в условиях *in vitro*, так и *in vivo*. Эти данные дают основу для обоснования проведения дальнейших исследований, а также указывают на важность и актуальность изучения мишеней и механизмов действия БАВ *Boswellia serrata* при различных заболеваниях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Каратеев А.Е., Лила А.М.* 2018. Остеоартрит: современная клиническая концепция и некоторые перспективные терапевтические подходы. – Научно-практическая ревматология. 56(1): 70–81. https://rsp.mediar-press.net/rsp/article/view/2502
2. *Чичасова Н.В., Имаметдинова Г.Р., Лила А.М.* 2020. Безопасная терапия остеоартрита: место топических нестероидных противовоспалительных препаратов. – Медицинский Совет. 8: 128–134. https://doi.org/10.21518/2079-701X-2020-8-128-134
3. *Ширинский В.С., Казыгашева Е.В., Ширинский И.В.* 2019. Воспаление и иммунитет: роль в патогенезе остеоартрита. – Медицинская иммунология. 21(1): 39–48. https://doi.org/10.15789/1563-0625-2019-1-39-48
4. *Раймуев К.В., Ищенко А.М., Малышев М.Е.* 2018. Провоспалительные и противовоспалительные цитокины в патогенезе остеоартрита. – Вестник Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова. 10(3): 19–27. https://doi.org/10.17816/mechnikov201810319-27
5. *Чичасова Н.В.* 2017. Обновленные международные рекомендации 2016 г. по ведению больных остеоартрозом: фокус на хондроитин сульфат, глюкозамин и их комбинацию (препарат Терафлекс®). – Consilium Medicum. 19(9): 69–76. https://doi.org/10.26442/2075-1753_19.9.69-76
6. *Alam M., KhanH., Samiullah L., Siddique K.M.* 2012. A review on phytochemical and pharmacological studies of kundur (*Boswellia serrata* Roxb ex Colebr.) – a Unani drug. – J. Appl. Pharm. Sci. 2(3): 148–156. https://www.japsonline.com/admin/php/uploads/411_pdf.pdf
7. *Тарек А.* 2013. Разработка состава и технологии таблеток с экстрактом *Boswelliaserrata*: Автореф. дис. ... канд. фарм. наук. М. 25 с.
8. *Catanzaro D., Rancan S., Orso G., Dall'Acqua S., Brun P., Giron M.C., Carrara M., Castagliuolo I., Ragazzi E., Caparrotta L., Montopoli M.* 2015. *Boswellia serrata*preserves intestinal epithelial barrier from oxidative and inflammatory damage. – PLoS One. 10(5): e0125375. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125375
9. *Upaganlawar A., Ghule B.* 2009. Pharmacological activities of *Boswellia serrata* Roxb. – Minireview. – Ethnobotanical Leaflets. 13: 766–774. https://www.probotanic.com/pdf_istrazivanja/ulje_tamjana/Farmakoloska%20aktivnost%20tamjana%20(Boswellia%20serrata)%20-%20pregled.pdf
10. *Siddiqui M.Z.* 2011. *Boswellia serrata*, a potential antiinflammatory agent: an overview. – Indian. J. Pharm. Sci. 73(3): 255–261. https://www.ijpsonline.com/articles/boswellia-serrata-a-potential-antiinflammatory-agent-an-overview.html
11. *Al-Yasiry A.R.M., Kiczorowska B.* 2016. Frankincense – Therapeutic properties. – Postepy Hig. Med. Dosw. 70: 380–391. https://doi.org/10.5604/17322693.1200553
12. *Pereira I., Severino P., Santos A.C., Silva A.M., Souto E.B.* 2018. Linalool bioactive properties and potential applicability in drug delivery systems. – Colloids Surf B Biointerfaces. 171: 566–578. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.08.001

13. *Gogoi R., Loying R., Sarma N., Begum T., Pandey S.K., Lal M.* 2020. Comparative analysis of *in-vitro* biological activities of methyl eugenol rich *Cymbopogon khasianus* Hack., leaf essential oil with pure methyl eugenol compound. – Curr. Pharm. Biotechnol. 21(10): 927–938.
https://doi.org/10.2174/1389201021666200217113921

14. *Sharma A., Chhikara S., Ghodekar S.N., Bhatia S., Kharya M.D., Gajbhiye V., Mann A.S., Namdeo A.G., Mahadik K.R.* 2009. Phytochemical and pharmacological investigations on *Boswellia serrata*. – Phcog. Rev. 3(5): 206–215.
https://www.phcogrev.com/article/2009/3/5-21

15. *Salehi B., Upadhyay S., Erdogan Orhan I., Kumar Jugran A., L.D. Jayaweera S., A. Dias D., Sharopov F., Taheri Y., Martins N., Baghalpour N., Cho W.C., Sharifi-Rad J.* 2019. Therapeutic potential of α- and β-pinene: a miracle gift of nature. – Biomolecules. 9(11): 738.
https://doi.org/10.3390/biom9110738

16. *Ryu Y., Lee D., Jung S.H., Lee K.J., Jin H., Kim S.J., Lee H.M., Kim B., Won K.J.* 2019. Sabinene prevents skeletal muscle atrophy by inhibiting the MAPK–MuRF-1 pathway in rats. – Int. J. Mol. Sci. 20(19): 4955.
https://doi.org/10.3390/ijms20194955

17. *de Christo Scherer M.M., Marques F.M., Figueira M.M., Peisino M.C.O., Schmitt E.F.P., Kondratyuk T.P., Endringer D.C., Scherer R., Fronza M.* 2019. Wound healing activity of terpinolene and α-phellandrene by attenuating inflammation and oxidative stress *in vitro*. – J. Tissue Viability. 28(2): 94–99.
https://doi.org/10.1016/j.jtv.2019.02.003

18. *Santos W.B.R., Melo M.A.O., Alves R.S., de Brito R.G., Rabelo T.K., Prado L.D.S., Silva V.K.D.S., Bezerra D.P., de Menezes-Filho J.E.R., Souza D.S., de Vasconcelos C.M.L., Scotti L., Scotti M.T., Lucca Júnior W., Quintans-Júnior L.J., Guimarães A.G.* 2019. p-Cymene attenuates cancer pain via inhibitory pathways and modulation of calcium currents. – Phytomedicine. 61: 152836.
https://doi.org/10.1016/j.phymed.2019.152836

19. *Mukhtar Y.M., Adu-Frimpong M., Xu X., Yu J.* 2018. Biochemical significance of limonene and its metabolites: future prospects for designing and developing highly potent anticancer drugs. – Biosci. Rep. 2018. 38(6): BSR20181253.
https://doi.org/10.1042/BSR20181253

20. *Alves Júnior E.B., de Oliveira Formiga R., de Lima Serafim C.A., Cristina Araruna M.E., de Souza Pessoa M.L., Vasconcelos R.C., de Carvalho T.G., de Jesus T.G., Araújo A.A., de Araujo Junior R.F., Vieira G.C., Sobral M.V., Batista L.M.* 2020. Estragole prevents gastric ulcers via cytoprotective, antioxidant and immunoregulatory mechanisms in animal models. – Biomed. Pharmacother. 130: 110578.
https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110578

21. *Islam A.U.S., Hellman B., Nyberg F., Amir N., Jayaraj R.L., Petroianu G., Adem A.* 2020. Myrcene attenuates renal inflammation and oxidative stress in the adrenalectomized rat model. – Molecules. 25(19): 4492.
https://doi.org/10.3390/molecules25194492

22. *El Gaafary M., Büchele B., Syrovets T., Agnolet S., Schneider B., Schmidt C.Q., Simmet T.* 2015. An α-acetoxy-tirucallic acid isomer inhibits Akt/mTOR signaling and induces oxidative stress in prostate cancer cells. – J. Pharmacol. Exp. Ther. 352(1): 33–42.
https://doi.org/10.1124/jpet.114.217323

23. *Schmidt C., Loos C., Jin L., Schmiech M., Schmidt C.Q., Gaafary M.E., Syrovets T., Simmet T.* 2017. Acetyl-lupeolic acid inhibits Akt signaling and induces apoptosis in chemoresistant prostate cancer cells *in vitro* and *in vivo*. – Oncotarget. 8(33): 55147–55161.
https://doi.org/10.18632/oncotarget.19101

24. *Salvador J.A.R., Leal A.S., Valdeira A.S., Gonçalves B.M.F., Alho D.P.S., Figueiredo S.A.C., Silvestre S.M., Mendes V.I.S.* 2017. Oleanane-, ursane-, and quinone methide friedelane-type triterpenoid derivatives: recent advances in cancer treatment. – Eur. J. Med. Chem. 142: 95–130.
https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2017.07.013

25. *Карлина М.В., Пожарицкая О.Н., Косман В.М.* 2007. Изучение биологической доступности босвеллиевых кислот: *in vitro/in vivo* корреляция. – Химико-фармацевтический журн. 41(11): 3–6.
http://chem.folium.ru/index.php/chem/article/view/705

26. *Roy N.K., Parama D., Banik K., Bordoloi D., Devi A.K., Thakur K.K., Padmavathi G., Shakibaei M., Fan L., Sethi G., Kunnumakkara A.B.* 2019. An update on pharmacological potential of boswellic acids against chronic diseases. – Int. J. Mol. Sci. 20(17): 4101.
https://doi.org/10.3390/ijms20174101

27. *Abdel-Tawab M., Werz O., Schubert-Zsilavecz M.* 2011. *Boswellia serrata:* an overall assessment of *in vitro*, preclinical, pharmacokinetic and clinical data. – Clin Pharmacokinet. 50(6): 349–69.
https://doi.org/10.2165/11586800-000000000-00000

28. *Kowalska T., Sherma J.* 2006. Preparative Layer Chromatography. Boca Raton. 424 p.

29. *Paul M., Brüning G., Bergmann J., Jauch J.* 2012. A thin-layer chromatography method for the identification of three different olibanum resins (*Boswellia serrata, Boswellia papyrifera* and *Boswellia carterii,* respectively, *Boswellia sacra*). – Phytochem Anal. 23(2): 184–189.
https://doi.org/10.1002/pca.1341

30. *Beghelli D., Isani G., Roncada P., Andreani G., Bistoni O., Bertocchi M., Lupidi G., Alunno A.* 2017. Antioxidant and *ex vivo* immune system regulatory properties of *Boswellia serrata* extracts. – Oxid. Med. Cell Longev. 2017: 7468064.
https://doi.org/10.1155/2017/7468064

31. *Wang M.X., Zhao J.X., Meng Y.J., Di T.T., Xu X.L., Xie X.J., Lin Y., Zhang L., Wang N., Li P., Wang Y.* 2018. Acetyl-11-keto-β-boswellic acid inhibits the secretion of cytokines by dendritic cells via the TLR7/8 pathway in an imiquimod-induced psoriasis mouse model and *in vitro.* – Life Sci. 207: 90–104.
https://doi.org/10.1016/j.lfs.2018.05.044

32. *Siemoneit U., Koeberle A., Rossi A., Dehm F., Verhoff M., Reckel S., Maier T.J., Jauch J., Northoff H., Bernhard F., Doetsch V., Sautebin L., Werz O.* 2011. Inhibition of microsomal prostaglandin $E_2$ synthase-1 as a molecular basis for the anti-inflammatory actions of boswellic acids from frankincense. – Br. J. Pharmacol. 162(1): 147–162.
https://doi.org/10.1111/j.1476-5381.2010.01020.x

33. *Majeed M., Majeed S., Narayanan N.K., Nagabhushanam K.* 2019. A pilot, randomized, double-blind, placebo-controlled trial to assess the safety and efficacy of a novel *Boswellia serrata* extract in the management of osteoarthritis of the knee. – Phytother. Res. 33(5): 1457–1468.
https://doi.org/10.1002/ptr.6338

34. *Efferth T., Oesch F.* 2022. Anti-inflammatory and anti-cancer activities of frankincense: targets, treatments and toxicities. – Semin. Cancer Biol. 80: 39–57.
https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2020.01.015

35. *Badria F.A., Mikhaeil B.R., Maatooq G.T., Amer M.M.* 2003. Immunomodulatory triterpenoids from the oleogum resin of *Boswellia carterii* Birdwood. – Z. Naturforsch. C. J. Biosci. 58(7–8): 505–16.
https://doi.org/10.1515/znc-2003-7-811

36. *Liu Z., Liu X., Sang L., Liu H., Xu Q., Liu Z.* 2015. Boswellic acid attenuates asthma phenotypes by downregulation of GATA3 via pSTAT6 inhibition in a murine model of asthma. – IJCEP. 8(1): 236–243.
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4348891

37. *Ammon H.P.T.* 2019. Boswellic extracts and 11-keto-ß-boswellic acids prevent type 1 and type 2 diabetes mellitus by suppressing the expression of proinflammatory cytokines. – Phytomedicine. 63: 153002.
https://doi.org/10.1016/j.phymed.2019.153002

# Component Composition and Biological Activity of Oleo-Gum Resin from *Boswellia serrata* (Burseraceae)

**M. O. Cherepanova[a], M. A. Subotyalov[a, b, *]**

[a] *Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russia*

[b] *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

**e-mail: subotyalov@yandex.ru*

**Abstract**—The paper overviews the publications on the identification of biologically active substances and the pharmacological potential of various components of the oleo-gum resin of *Boswellia serrata* Roxb. ex Colebr., also known as Indian frankincense. The analysis showed that the composition of *Boswellia* oleo-gum resin contains a wide range of BAS from the classes of mono-, sesqui-, di- and triterpenes. Numerous *in vivo* and *in vitro* studies have demonstrated their anti-inflammatory and antiproliferative effects. Boswellic acids from the tetra- and pentacyclic triterpenoid classes showed the highest anti-inflammatory activity. The review showed that the frankincense resin traditionally used in Ayurvedic and Unani medicine can become an effective anti-arthritic agent and a promising substance for the development of musculoskeletal disorders drugs.

*Keywords:* osteoarthritis, oleo-gum resin, boswellic acids, *Boswellia serrata*, chronic inflammation, terpenes, essential oil, resin

## REFERENCES


1. *Karateev A.E., Lila A.M.* 2018. Osteoarthritis: current clinical concept and some promising therapeutic approaches. – Rheumatology Science and Practice. 56(1): 70–81.
https://rsp.mediar-press.net/rsp/article/view/2502 (In Russian)
2. *Chichasova N.V., Imametdinova G.R., Lila A.M.* 2020. Safe therapy of osteoarthritis: place of topical non-steroidal antiinflammatory drugs. – Medical Council. 8: 128–134.
https://doi.org/10.21518/2079-701X-2020-8-128-134 (In Russian)
3. *Shirinsky V.S., Kazygasheva E.V., Shirinsky I.V.* 2019. Inflammation and immunity: a role of pathogenesis of osteoarthritis. – Medical Immunology (Russia). 21(1): 39–48.
https://doi.org/10.15789/1563-0625-2019-1-39-48 (In Russian)
4. *Raymuev K.V., Ishenko A.M., Malyshev M.E.* 2018. Pro-inflammatory and anti-inflammatory cytokines in the pathogenesis of osteoarthritis. – Herald of North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov. 10(3): 19–27.
https://doi.org/10.17816/mechnikov201810319-27 (In Russian)
5. *Chichasova N.V.* 2017. Updated international guidelines for the management of patients with osteoarthritis in 2016: focus on chondroitin sulfate, glucosamine and their combination (Theraflex®). – Consilium Medicum. 19(9): 69–76.
https://doi.org/10.26442/2075-1753_19.9.69-76 (In Russian)
6. *Alam M., Khan H., Samiullah L., Siddique K.M.* 2012. A review on phytochemical and pharmacological studies of kundur (*Boswellia serrata* Roxb ex Colebr.) – a Unani drug. – J. Appl. Pharm. Sci. 2(3): 148–156.
https://www.japsonline.com/admin/php/uploads/411_pdf.pdf
7. *Tarek A.* 2013. [Development of the composition and technology of tablets with *Boswellia serrata* extract: Abstr. ...Dis. Cand. (Farmacology) Sci.] Moscow. 25 p. (In Russian)
8. *Catanzaro D., Rancan S., Orso G., Dall'Acqua S., Brun P., Giron M.C., Carrara M., Castagliuolo I., Ragazzi E., Caparrotta L., Montopoli M.* 2015. *Boswellia serrata* preserves intestinal epithelial barrier from oxidative and inflammatory damage. – PLoS One. 10(5): e0125375.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125375
9. *Upaganlawar A., Ghule B.* 2009. Pharmacological activities of *Boswellia serrata* Roxb. – Minireview. – Ethnobotanical Leaflets. 13: 766–774.
https://www.probotanic.com/pdf_istrazivanja/ulje_tamjana/Farmakoloska%20aktivnost%20tamjana%20(Boswellia%20serrata)%20-%20pregled.pdf
10. *Siddiqui M.Z.* 2011. *Boswellia serrata*, a potential antiinflammatory agent: an overview. – Indian J. Pharm. Sci. 73(3): 255–261.
https://www.ijpsonline.com/articles/boswellia-serrata-a-potential-antiinflammatory-agent-an-overview.html
11. *Al-Yasiry A.R.M., Kiczorowska B.* 2016. Frankincense – therapeutic properties. – Postepy Hig Med Dosw. 70: 380–391.
https://doi.org/10.5604/17322693.1200553
12. *Pereira I., Severino P., Santos A.C., Silva A.M., Souto E.B.* 2018. Linalool bioactive properties and potential applicability in drug delivery systems. – Colloids Surf. B. Biointerfaces. 171: 566–578.
https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.08.001
13. *Gogoi R., Loying R., Sarma N., Begum T., Pandey S.K., Lal M.* 2020. Comparative analysis of *in-vitro* biological activities of methyl eugenol rich *Cymbopogon khasianus* Hack., leaf essential oil with pure methyl eugenol compound. – Curr. Pharm. Biotechnol. 21(10): 927–938.
https://doi.org/10.2174/1389201021666200217113921
14. *Sharma A., Chhikara S., Ghodekar S.N., Bhatia S., Kharya M.D., Gajbhiye V., Mann A.S., Namdeo A.G., Mahadik K.R.* 2009. Phytochemical and pharmacological investigations on *Boswellia serrata*. – Phcog. Rev. 3(5): 206–215.
https://www.phcogrev.com/article/2009/3/5-21
15. *Salehi B., Upadhyay S., Erdogan Orhan I., Kumar Jugran A., L. D. Jayaweera S., A. Dias D., Sharopov F., Taheri Y., Martins N., Baghalpour N., Cho W.C., Sharifi-Rad J.* 2019. Therapeutic potential of α- and β-pinene: a miracle gift of nature. – Biomolecules. 9(11): 738.
https://doi.org/10.3390/biom9110738
16. *Ryu Y., Lee D., Jung S.H., Lee K.J., Jin H., Kim S.J., Lee H.M., Kim B., Won K.J.* 2019. Sabinene prevents skeletal muscle atrophy by inhibiting the MAPK–MuRF-1 pathway in rats. – Int. J. Mol. Sci. 20(19): 4955.
https://doi.org/10.3390/ijms20194955
17. *de Christo Scherer M.M., Marques F.M., Figueira M.M., Peisino M.C.O., Schmitt E.F.P., Kondratyuk T.P., Endringer D.C., Scherer R., Fronza M.* 2019. Wound healing activity of terpinolene and α-phellandrene by attenuating inflammation and oxidative stress *in vitro*. – J. Tissue Viability. 28(2): 94–99.
https://doi.org/10.1016/j.jtv.2019.02.003
18. *Santos W.B.R., Melo M.A.O., Alves R.S., de Brito R.G., Rabelo T.K., Prado L.D.S., Silva V.K.D.S., Bezerra D.P., de Menezes-Filho J.E.R., Souza D.S., de Vasconcelos C.M.L., Scotti L., Scotti M.T., Lucca Júnior W., Quintans-Júnior L.J.,*

*Guimarães A.G.* 2019. p-Cymene attenuates cancer pain via inhibitory pathways and modulation of calcium currents. – Phytomedicine. 61: 152836.
https://doi.org/10.1016/j.phymed.2019.152836

19. *Mukhtar Y.M., Adu-Frimpong M., Xu X., Yu J.* 2018. Biochemical significance of limonene and its metabolites: future prospects for designing and developing highly potent anticancer drugs. – Biosci .Rep. 2018. 38(6): BSR20181253.
https://doi.org/10.1042/BSR20181253

20. *Alves Júnior E.B., de Oliveira Formiga R., de Lima Serafim C.A., Cristina Araruna M.E., de Souza Pessoa M.L., Vasconcelos R.C., de Carvalho T.G., de Jesus T.G., Araújo A.A., de Araujo Junior R.F., Vieira G.C., Sobral M.V., Batista L.M.* 2020. Estragole prevents gastric ulcers via cytoprotective, antioxidant and immunoregulatory mechanisms in animal models. – Biomed. Pharmacother. 130: 110578.
https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110578

21. *Islam A.U.S., Hellman B., Nyberg F., Amir N., Jayaraj R.L., Petroianu G., Adem A.* 2020. Myrcene attenuates renal inflammation and oxidative stress in the adrenalectomized rat model. – Molecules. 25(19): 4492.
https://doi.org/10.3390/molecules25194492

22. *El Gaafary M., Büchele B., Syrovets T., Agnolet S., Schneider B., Schmidt C.Q., Simmet T.* 2015. An α-acetoxy-tirucallic acid isomer inhibits Akt/mTOR signaling and induces oxidative stress in prostate cancer cells. – J. Pharmacol. Exp. Ther. 352(1): 33–42.
https://doi.org/10.1124/jpet.114.217323

23. *Schmidt C., Loos C., Jin L., Schmiech M., Schmidt C.Q., Gaafary M.E., Syrovets T., Simmet T.* 2017. Acetyl-lupeolic acid inhibits Akt signaling and induces apoptosis in chemoresistant prostate cancer cells *in vitro* and *in vivo*. – Oncotarget. 8(33): 55147–55161.
https://doi.org/10.18632/oncotarget.19101

24. *Salvador J.A.R., Leal A.S., Valdeira A.S., Gonçalves B.M.F., Alho D.P.S., Figueiredo S.A.C., Silvestre S.M., Mendes V.I.S.* 2017. Oleanane-, ursane-, and quinone methide friedelane-type triterpenoid derivatives: recent advances in cancer treatment. – Eur. J. Med. Chem. 142: 95–130.
https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2017.07.013

25. *Karlina M.V., Pozharitskaya O.N., Kosman V.M., Ivanova S.A.* 2007. Bioavailability of boswellic acids: *in vitro / in vivo* correlation. – Khimiko-Farmatsevticheskii Zhurnal. 41(11): 3–6.
http://chem.folium.ru/index.php/chem/article/view/705 (In Russian)

26. *Roy N.K., Parama D., Banik K., Bordoloi D., Devi A.K., Thakur K.K., Padmavathi G., Shakibaei M., Fan L., Sethi G., Kunnumakkara A.B.* 2019. An update on pharmacological potential of boswellic acids against chronic diseases. – Int. J. Mol. Sci. 20(17): 4101.
https://doi.org/10.3390/ijms20174101

27. *Abdel-Tawab M., Werz O., Schubert-Zsilavecz M.* 2011. *Boswellia serrata:* an overall assessment of *in vitro*, preclinical, pharmacokinetic and clinical data. – Clin. Pharmacokinet. 50(6): 349–69.
https://doi.org/10.2165/11586800-000000000-00000

28. *Kowalska T., Sherma J.* 2006. Preparative Layer Chromatography. Boca Raton. 424 p.

29. *Paul M., Brüning G., Bergmann J., Jauch J.* 2012. A thin-layer chromatography method for the identification of three different olibanum resins (*Boswellia serrata*, *Boswellia papyrifera* and *Boswellia carterii,* respectively, *Boswellia sacra*). – Phytochem. Anal. 23(2): 184–189.
https://doi.org/10.1002/pca.1341

30. *Beghelli D., Isani G., Roncada P., Andreani G., Bistoni O., Bertocchi M., Lupidi G., Alunno A.* 2017. Antioxidant and *ex vivo* immune system regulatory properties of *Boswellia serrata* extracts. – Oxid. Med. Cell. Longev. 2017: 7468064.
https://doi.org/10.1155/2017/7468064

31. *Wang M.X., Zhao J.X., Meng Y.J., Di T.T., Xu X.L., Xie X.J., Lin Y., Zhang L., Wang N., Li P., Wang Y.* 2018. Acetyl-11-keto-β-boswellic acid inhibits the secretion of cytokines by dendritic cells via the TLR7/8 pathway in an imiquimod-induced psoriasis mouse model and *in vitro*. – Life Sci. 207: 90–104.
https://doi.org/10.1016/j.lfs.2018.05.044

32. *Siemoneit U., Koeberle A., Rossi A., Dehm F., Verhoff M., Reckel S., Maier T.J., Jauch J., Northoff H., Bernhard F., Doetsch V., Sautebin L., Werz O.* 2011. Inhibition of microsomal prostaglandin $E_2$ synthase-1 as a molecular basis for the anti-inflammatory actions of boswellic acids from frankincense. – Br. J. Pharmacol. 162(1): 147–162.
https://doi.org/10.1111/j.1476-5381.2010.01020.x

33. *Majeed M., Majeed S., Narayanan N.K., Nagabhushanam K.* 2019. A pilot, randomized, double-blind, placebo-controlled trial to assess the safety and efficacy of a novel *Boswellia serrata* extract in the management of osteoarthritis of the knee. – Phytother. Res. 33(5): 1457–1468.
https://doi.org/10.1002/ptr.6338

34. *Efferth T., Oesch F.* 2022. Anti-inflammatory and anti-cancer activities of frankincense: targets, treatments and toxicities. – Semin. Cancer Biol. 80: 39–57.
https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2020.01.015

35. *Badria F.A., Mikhaeil B.R., Maatooq G.T., Amer M.M.* 2003. Immunomodulatory triterpenoids from the oleogum resin of *Boswellia carterii* Birdwood. – Z. Naturforsch. C. J. Biosci. 58(7–8): 505–16.
https://doi.org/10.1515/znc-2003-7-811

36. *Liu Z., Liu X., Sang L., Liu H., Xu Q., Liu Z.* 2015. Boswellic acid attenuates asthma phenotypes by downregulation of GATA3 via pSTAT6 inhibition in a murine model of asthma. – IJCEP. 8(1): 236–243.
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4348891

37. *Ammon H.P.T.* 2019. Boswellic extracts and 11-keto-ß-boswellic acids prevent type 1 and type 2 diabetes mellitus by suppressing the expression of proinflammatory cytokines. – Phytomedicine. 63: 153002.
https://doi.org/10.1016/j.phymed.2019.153002

**EDN:** RZQSWR
*РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, 2022, том 58, вып. 2, с. 124–134*

**СТАТЬИ И СООБЩЕНИЯ**
**РЕСУРСЫ ПОЛЕЗНЫХ РАСТЕНИЙ И РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ**

# СОСТОЯНИЕ ЦЕНОПОПУЛЯЦИЙ ТИСА ОСТРОКОНЕЧНОГО *TAXUS CUSPIDATA* (TAXACEAE) В НАЦИОНАЛЬНОМ ПАРКЕ “УДЭГЕЙСКАЯ ЛЕГЕНДА” (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)

**© 2022 г. Г. А. Гладкова[1, *], Л. А. Сибирина[1]**

[1]*ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН), г. Владивосток, Россия*

**e-mail: Gladkova@biosoil.ru*

Поступила в редакцию 03.08.2021 г.
После доработки 05.10.2021 г.
Принята к публикации 03.03.2022 г.

Дана оценка санитарного состояния популяции *Taxus cuspidata* Siebold et Zucc., основанная на анализе материалов, полученных в ходе полевых исследований на территории национального парка “Удэгейская легенда” (Приморский край). Объектом исследования послужили 5 ценопопуляций тиса остроконечного (924 особи). Расположение каждого экземпляра тиса регистрировалось GPS-навигатором, проводилось измерение его диаметра на высоте груди (1.3 м), а также выполнялась визуальная оценка состояния деревьев. Указаны наиболее часто встречающиеся повреждения стволов: сухобокость, суховершинность и дуплистость. Установлено распределение деревьев по категориям санитарного состояния в соответствии с действующими нормативными документами с некоторыми изменениями. Перечень узаконенных внешних патологических признаков, по которым определяется санитарное состояние деревьев не всегда подходит для “краснокнижного” *T. cuspidata*. Выявленные у деревьев тиса патологические признаки чаще всего не приводят к их гибели, в связи с чем количество усохших особей крайне незначительно. Для *T. cuspidata* характерно почти полное отсутствие плодовых тел дереворазрушающих грибов.

*Ключевые слова: Taxus cuspidata*, диагностические признаки повреждений, оценка состояния ценопопуляций, Приморский край

**DOI:** 10.31857/S0033994622020078

Тис остроконечный (*Taxus cuspidata* Siebold et Zucc.) – реликтовое хвойное дерево, имеющее экономическую ценность. В коре, корнях, хвое и семенах тиса выявлено около 193 соединений [1], среди них паклитаксел (таксол), относящийся к таксанам и обладающий противораковыми свойствами, а также большое количество нетаксановых соединений – сесквитерпен, экдистероиды, стероиды, лигнаны, флавоноиды и др. На территории России тис встречается одиночно или небольшими группами в хвойно-широколиственных лесах Приморья, Хабаровского края, на Сахалине и Курильских островах, а за пределами России в Японии, Китае и Корее [2]. Сообщества с преобладанием тиса остроконечного принадлежат к числу реликтовых и редких лесных формаций российского Дальнего Востока [3].

*Taxus cuspidata* получил международный охранный статус Least Concern (вызывающие наименьшее опасение) [4], который в настоящее время нуждается в пересмотре из-за возможности локального вымирания этого вида в Китае [5]. Для сохранения и восстановления *T. cuspidata* китайцы высадили семь миллионов саженцев тиса для медицинских и противоэрозионных целей по программе, направленной на сохранение 14 лучших видов растений наиболее подверженных риску и имеющих крайне малые популяции [6].

Сведения о состоянии деревьев тиса остроконечного в материковой части Приморского края малочисленны из-за редкости и рассеянности объекта. Б.П. Колесников [7] описал в бассейне р. Сица (р. Серебрянка) редкую ассоциацию долинного кедрово-елового леса с участием совершенно здорового, обильно семеносящего тиса с диаметром стволов от 20 до 60 см (до 50–60 экз./га), а в долине р. Белембе (р. Таежная) среди еловопихтового леса участок с плотностью на 1 га “около 80–100 стволов тиса высокого возраста и сравнительно здорового вида” [8: 40]. Г.Э. Куренцовой [9] были обследованы незначительные скопления тиса с диаметром стволов 74–100 см (17 деревьев) в истоках р. Малая Эльдуга (р. Малая Ананьевка) в южном Приморье: из 17 деревьев – 9 имели хо-

рошее состояние, 7 – удовлетворительное 1 – фаутное. Н.П. Присяжнюком [10] в Лазовском заповеднике была изучена небольшая по численности популяция тиса, где из семи местонахождений хорошее состояние тиса было отмечено только в районе ключа Лесосечный и на о-ве Петрова.

В настоящее время в Приморском крае происходит резкое снижение численности тиса из-за неблагоприятных естественных (повреждение животными) и антропогенных воздействий (пожары, рубки, прокладка линейных объектов). В национальном парке "Удэгейская легенда" сохранилась одна из наиболее многочисленных популяций тиса. На указанной территории определение санитарного состояния тиса ранее не выполняли.

Целью исследования явилась оценка санитарного состояния ценопопуляций *Taxus cuspidata* на территории национального парка "Удэгейская легенда" для сохранения этого ценного вида.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Национальный парк "Удэгейская легенда" расположен в Красноармейском районе Приморского края в бассейне рек западного макросклона центрального Сихотэ-Алиня (Большая Уссурка, Арму). Климат в районе исследования континентальный с муссонными элементами [11]. Для территории парка характерно большое фитоценотическое и экологическое разнообразие слабо нарушенных хвойно-широколиственных лесов, основу которых составляют широколиственно-кедровые леса [12–14]. Почвы под хвойно-широколиственными лесами с тисом – буроземы типичные и слабооподзоленные, формирующиеся на сильно щебнистом суглинисто-глинистом бескарбонатном элюво-делювии осадочных и магматических пород. Они хорошо дренированы, имеют реакцию среды от кислой до слабокислой – pH 3.9–5.96. Естественная влажность в органо-минеральных горизонтах варьирует от 39 до 129% [15].

Объектом исследования послужили 5 ценопопуляций тиса остроконечного в широколиственно-кедровых и кедрово-еловых лесах, находящихся в бассейнах ключей, впадающих в р. Большая Уссурка (табл. 1). Чаще всего тис встречается в составе второго яруса и редко превышает в высоту 14–15 м. Иногда он может доминировать на небольших участках как, например, в бассейне ключа Ковалевский [16].

В течение 2015–2019 гг. на всей территории парка проводили точечный учет охраняемых видов сосудистых растений в рамках мониторинга лесного биоразнообразия [17]. Расположение каждого экземпляра тиса регистрировалось GPS-навигатором, проводилось измерение его диаметра на высоте груди (1.3 м), а также выполнялась визуальная оценка состояния деревьев согласно ГОСТ 57973-2017 [18] и "Правилам санитарной безопасности в лесах" [19, 20].

Так как тис является деревом-долгожителем и его биология отличается от других хвойных пород уникальной способностью к выживанию и постоянной регенерации, то в диагностические признаки по категориям санитарного состояния деревьев были внесены изменения. Деревья даже со значительными структурными изъянами – наличием обширных гнилей, опасного наклона, усыхания более 2/3 ветвей, сильной изреженности кроны – были отнесены к сильно ослабленным. Живые деревья тиса, приваленные другими породами в результате ветровала и бурелома, сломанные или фрагментированные из-за обширных стволовых гнилей, или имеющие желтую хвою, были причислены к усыхающим. Погибшие тисы имели расколотый ствол, или полностью вывернутые на дневную поверхность корни, или усохли по иным причинам.

Средневзвешенная категория санитарного состояния деревьев тиса ($K_{ср}$) рассчитывалась на основе учета доли деревьев каждой категории санитарного состояния [20]. Так как этот вид является охраняемым, расчет произведен по числу стволов.

$$K_{ср} = \Sigma(P_i \times K_i)/100,$$

где: $P_i$ – доля деревьев каждой категории санитарного состояния в процентах от общего числа особей; $K_i$ – категории состояния дерева ($K_i = 1$ – здоровое (без признаков ослабления), $K_i = 2$ – ослабленное, $K_i = 3$ – сильно ослабленное, $K_i = 4$ – усыхающее, $K_i = 5$ – погибшее).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В национальном парке "Удэгейская легенда" были обследованы 924 особи тиса остроконечного (в это число не вошли деревья, растущие в бассейне ключа Левый Михайловский, там состояние тиса не оценивалось). Возраст самых крупных деревьев тиса остроконечного достигает 500 и более лет [21].

В различных нормативных документах жизнеспособность деревьев определяется главным образом по состоянию кроны. Крона у деревьев тиса, относящихся к категориям здоровых и ослабленных, густая, хвоя темно-зеленая. У сильно ослабленных особей крона разреженная, с многочисленными усыхающими или усохшими ветвями, хвоя темно-зеленая. Цвет хвои практически не зависит от категории санитарного состояния.

Для тиса остроконечного наиболее типичны повреждения стволов. Почти все исследователи обращали внимание на сильно выраженную сердцевинную гниль [2, 10, 16, 22, 23 и др.]. Повреждения ствола и ветвей животными (обдиры, обгрызы),

**Таблица 1.** Характеристика основных мест произрастания *Taxus cuspidate*
**Table 1.** *Taxus cuspidata* habitat characteristics

| Местоположение<br>Site | Широта/долгота<br>Latitude/longitude | Экспозиция<br>Aspect | Высота над уровнем моря, м<br>Elevation above msl, m | Площадь, га/ Количество, экз.<br>Area, ha/Number of individuals | Тип леса**<br>Forest type (dominant species) |
|---|---|---|---|---|---|
| Водораздел*<br>Watershed* | N 45°47′32″<br>E 135°18′2″ | ЗСЗ<br>WNW | 280–410 | 3/100 | Кедровник с липой и дубом кленово-лещинный папоротниково-разнотравный<br>*Pinus koraiensis–Tilia amurensis–Quercus mongolica–Acer* |
| Ковалевский ключ<br>Kovalevsky Klyuch river | N 45°47′5″<br>E 135°18′55″ | С, ССВ, СЗ<br>N, NNE, NW | 250–350 | 16/684 | Кедрово-елово-тисовый лес с лиственными породами разнокустарниково-папоротниково-разнотравный<br>*Pinus koraiensis–Picea jezoensis–Taxus cuspidata* |
| Николаев ключ<br>Nikolaev Klyuch river | N 45°47′29″<br>E 135°25′46″<br>N 45°47′21″<br>E 135°25′6″ | З<br>W<br>В<br>E | 250–550<br>300–310 | Рассеянно по склону/16<br>Scattered by the slope/16 | Кедровник с липой и дубом лещинный<br>*Pinus koraiensis–Tilia amurensis–Quercus mongolica*<br>Кедровник с желтой березой разнокустарниково-кониограммовый<br>*Pinus koraiensis–Betula costata* |
| Яков ключ<br>Yakov Klyuch river | N 45°45′37″<br>E 135°25′34″ | СВ<br>NE | 270–295 | 5.5/116 | Кедрово-елово-тисовый лес с ясенем и березой желтой папоротниково-разнотравный<br>*Pinus koraiensis–Picea jezoensis–Taxus cuspidata* |
| Трофимов ключ<br>Trofimov Klyuch river | N 45°38′27″<br>E 135°21′19″ | СВ, С<br>NE, N | 295–475 | Рассеянно по склону/8<br>Scattered by the slope/8 | Кедровник с березой желтой разнокустарниковый<br>*Pinus koraiensis–Betula costata* |

Примечание. Здесь и в табл. 2–5: Водораздел* – водораздел р. Большая Уссурка – Ковалевский Ключ. ** – Типы леса приведены по [10].
Note. Here and in Tables 2–5: Watershed* is the watershed of the Bolshaya Ussurka River and Kovalevsky Klyuch. ** – Forest types are given by [10].

**Таблица 2.** Количество *Taxus cuspidata* с видимыми повреждениями
**Table 2.** The number of *Taxus cuspidata* with visible damage

| Типы повреждения<br>Types of damage | Водораздел<br>Watershed | Ковалевский ключ<br>Kovalevsky Klyuch | Николаев ключ<br>Nikolaev Klyuch | Яков ключ<br>Yakov Klyuch | Трофимов ключ<br>Trofimov Klyuch | Всего повреждений, экз./ % от общего числа деревьев<br>Total damage, ind./ % of the total number of trees |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | количество повреждений, экз./% от общего числа деревьев<br>number of damages, ind./% of the total number of trees | | | | | |
| Дупло<br>Hollows | 3/3.0 | 36/5.3 | 1/6.2 | 15/12.9 | 2/25.0 | 57/6.2 |
| Морозная трещина<br>Frost cracks | 4/4.0 | 2/0.3 | 0 | 0 | 0 | 6/0.6 |
| Нарост<br>Burr knots | 0 | 3/0.4 | 0 | 0 | 0 | 3/0.3 |
| Ошмыг<br>Mechanical damage of bark | 2/2.0 | 9/1.3 | 0 | 0 | 0 | 11/1.2 |
| Обдир, обгрыз<br>Bark stripping, browsing | 7/7.0 | 3/0.4 | 1/6.2 | 1/0.9 | 0 | 11/1.2 |
| Стволовые и комлевые гнили<br>Trunk and clump rot | 0 | 16/2.3 | 2/12.5 | 9/7.8 | 0 | 27/2.9 |
| Сухобокость<br>Drying cracks | 17/17.0 | 148/21.6 | 4/25.0 | 21/18.1 | 2/25.0 | 192/20.8 |
| Суховершинность<br>Tree-top dieback | 5/5.0 | 52/7.6 | 3/18.8 | 8/6.9 | 2/25.0 | 70/7.6 |
| Всего деревьев<br>Total number of trees | 100 | 684 | 16 | 116 | 8 | 924 |

а также травмирование тиса падающими деревьями открывают доступ бактериям и грибам, которые вызывают гниение древесины, происходящее в течение очень длительного времени. При визуальном осмотре зарегистрировано 27 стволов, сильно поврежденных гнилями (табл. 2, рис. 1), что составляет 2.9% от общего количества деревьев. Метод бурения, применяемый для уточнения пораженности гнилями, не использовался, так как тис занесен в региональные Красные книги и Красную книгу РФ [24, 25 и др.]. Косвенно на наличие скрытых гнилей может указывать большая встречаемость сухобочин (сухобокость) – 192 дерева (20.8%), а также суховершинность – 70 деревьев (7.6%) и не заросшие дупла – 57 (6.2%). На одном дереве может быть отмечено несколько патологических признаков. Реже всего у тиса встречаются каповые наросты, морозные трещины. Механические (ошмыги) и биологические (обдиры, обгрызы) повреждения были отмечены на 22 молодых стволах, что составляет 2.4% от общего числа повреждений. Если исходить из того, что "сухобокость" это – "омертвевший в процессе роста дерева участок поверхности ствола, возникший в результате повреждений (ушиб, заруб)" – ГОСТ 2140-81 [26], то получается, что большая доля патологических повреждений тиса обусловлена травмами, полученными им за долгую жизнь. В пользу этого свидетельствует то, что на стволах тиса практически не встречаются дереворазрушающие грибы (плодовое тело было встречено только единожды).

Естественные пороки формы ствола (многостволие, наклон, срастание, искривление) наблюдаются не часто (табл. 3). Наклоненных и многоствольных деревьев немного – соответственно 2.8 и 2.3% от общего количества учтенных деревьев тиса.

Здоровых (без признаков ослабления) деревьев тиса было учтено 565 стволов, что составляет

**Рис. 1.** *Taxus cuspidata*: (*a*) – стволовая гниль, Николаев ключ; (*b*) – дупло (1) и сухобокость (2), Яков ключ; (*c*) – усыхающее дерево, Яков ключ.
**Fig. 1.** *Taxus cuspidata*: (*a*) – trunk rot, Nikolaev Klyuch; (*b*) – hollow (1) and drying crack (2), Yakov Klyuch; (*c*) – declining tree, Yakov Klyuch.

**Таблица 3.** Количество *Taxus cuspidata* с естественными пороками ствола
**Table 3.** The number of *Taxus cuspidata* having natural stem damages

| Тип повреждения ствола<br>Types of damages | Водораздел<br>Watershed | Ковальский ключ<br>Kovalevsky Klyuch | Николаев ключ<br>Nikolaev Klyuch | Яков ключ<br>Yakov Klyuch | Всего повреждений, экз./% от общего числа деревьев<br>Total stem defects, ind./% of the total number of trees |
|---|---|---|---|---|---|
| | количество повреждений, экз./% от общего числа деревьев<br>number of stem defects, ind./% of the total number of trees | | | | |
| Сросшийся ствол<br>Fused trunk | 0 | 2/0.3 | 0 | 0 | 2/0.2 |
| Искривление ствола<br>Curved trunk | 2/2.0 | 5/0.7 | 0 | 2/1.7 | 9/1.0 |
| Многостволие<br>Multiple stemmed | 3/3.0 | 18/2.6 | 0 | 0 | 21/2.3 |
| Наклон<br>Lean tree | 1/1.0 | 21/3.1 | 1/6.2 | 3/2.6 | 26/2.8 |
| Всего деревьев<br>Total number of trees | 100 | 684 | 16 | 116 | 924 |

**Таблица 4.** Распределение деревьев *Taxus cuspidata* по категориям санитарного состояния
**Table 4.** Distribution of *Taxus cuspidata* trees by health class

| Категория санитарного состояния<br>Category of the sanitary condition | Водораздел<br>Watershed | Ковалевский ключ<br>Kovalevsky Klyuch | Николаев ключ<br>Nikolaev Klyuch | Яков ключ<br>Yakov Klyuch | Трофимов ключ<br>Trofimov Klyuch | Всего, экз./% от общего числа<br>Total /% of the total number |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | количество деревьев, экз./% от общего числа деревьев<br>number of trees, ind./% of the total number | | | | | |
| Здоровые<br>Healthy | 59/59.0 | 418/61.1 | 7/43.8 | 78/67.2 | 3/37.5 | 565/61.1 |
| Ослабленные<br>Weakened | 26/26.0 | 54/7.9 | 1/6.2 | 21/18.1 | 3/37.5 | 105/11.4 |
| Сильно ослабленные<br>Severely weakened | 12/12.0 | 195/28.5 | 6/37.6 | 14/12.1 | 2/25.0 | 229/24. 8 |
| Усыхающие<br>Declining | 2/2.0 | 10/1.5 | 1/6.2 | 3/2.6 | 0 | 16/1.7 |
| Погибшие<br>Dead | 1/1.0 | 7/1.0 | 1/6.2 | 0 | 0 | 9/1.0 |
| Средний диаметр, см<br>Average DBH, cm | 21.4 | 23.7 | 33.9 | 27.1 | – | – |
| Средневзвешенная категория санитарного состояния деревьев, $K_{ср}$<br>Weighted average category of sanitary condition of trees, $K_{ср}$ | 1.60 | 1.73 | 2.25 | 1.50 | – | – |

Примечание. Прочерк означает, что для Трофимова ключа этот показатель не рассчитывался из-за малочисленности деревьев тиса.
Note. The dash means that for Trofimov Klyuch this indicator was not calculated due to the small number of T. cuspidata trees.

61.1% от общего количества зарегистрированных экземпляров (табл. 4). Сильно ослабленные деревья – 229 экз. занимают второе место по численности (24.8%). Третье место по численности – 105 экз. (11.4%) принадлежит ослабленным деревьям. К усыхающим отнесено 16 деревьев (1.7% от общего количества). Погибших особей тиса всего 9 (1.0% от общего числа). Эти потери не относятся к годовому отпаду, а накопились за неопределенный период.

В ценопопуляциях наблюдается различное соотношение здоровых и ослабленных деревьев тиса (табл. 4). Наибольший процент здоровых деревьев тиса отмечен в сообществах, находящихся в районе ключей Яков – 67.2% и Ковалевский – 61.1%, наименьший – в районе ключей Николаев – 43.8% и Трофимов – 37.5%.

Распределение тиса по категориям санитарного состояния в зависимости от диаметра, приведенное на рис. 2 показывает, что максимальное количество здоровых деревьев находится в ступенях толщины 16, 20, 24, а с увеличением диаметра стволов растет численность ослабленных и сильно ослабленных особей.

Анализ распределения особей тиса по категориям санитарного состояния и расчет средней категории состояния по числу стволов (табл. 4) показал, что полученные величины $K_{ср}$ находятся в интервале 1.50–2.25, что свидетельствует об ослабленном состоянии древостоев, особенно в бассейне ключа Николаев, где ценопопуляция тиса малочисленна и имеет высокий возраст. Менее ослабленными являются ценопопуляции этого вида в бассейне Якова ключа и на водоразделе.

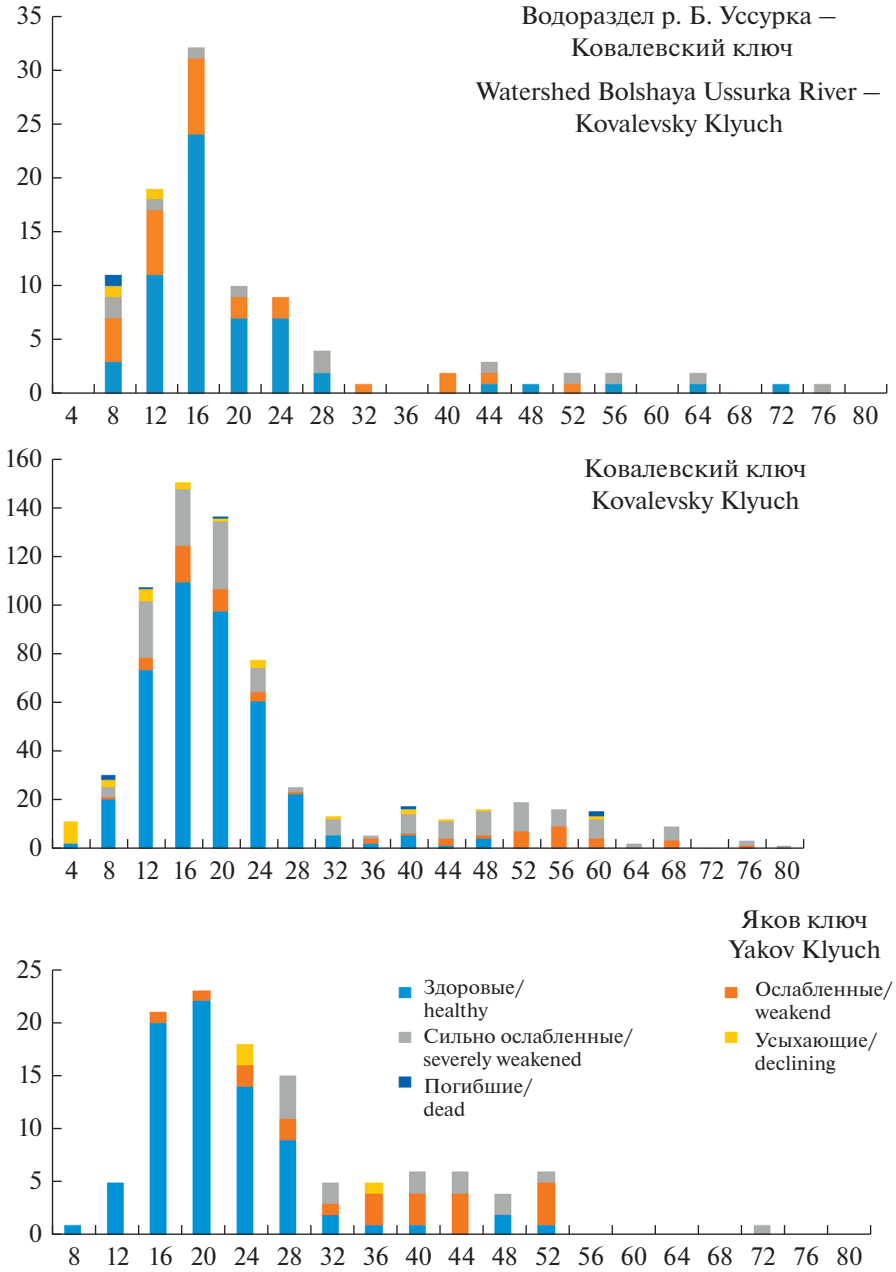



**Рис. 2.** Распределение *Taxus cuspidata* по категориям санитарного состояния в зависимости от диаметра. Данные по ключам Николаев и Трофимов не приводятся из-за малочисленности тиса.
*По горизонтали* – ступени толщины, см, *по вертикали* – количество, шт.
**Fig. 2.** *Taxus cuspidata* health class distribution dependence on trunk diameter Data on the Nikolaev Klyuch and Trofimov Klyuch are not given due to the small number of *T. cuspidata* individuals.
*X-axis* – diameter class, cm; *y-axis* – number of trees, inds.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обследование ценопопуляций *Taxus cuspidata* на территории национального парка “Удэгейская легенда” выявила характерные особенности санитарного состояния этого редкого вида, обусловленные его биологией и стратегией выживания. Выполненное исследование показало, что жизненность деревьев тиса трудно оценить визуально. Не всегда возможно определить четкую границу между категориями состояния, часто приходится руководствоваться дополнительными признаками. При визуальной оценке состояния деревьев в первую очередь выявляются повреждения ствола и суховершинность, которые также могут свидетельствовать о наличии гнилей [27]. На стволах тиса практически отсутствуют плодовые тела дереворазрушающих грибов, но в массе отмечены следы механических повреждений, такие как сухобокость, обдиры, обгрызы.

Проведенный осмотр показал, что деревья тиса очень редко подвержены ветровалу и бурелому. Чаще всего они страдают от падения деревьев других пород с низкой ветроустойчивостью, например, ели аянской или сосны корейской. Небольшое количество усыхающих и сухих деревьев тиса объясняется стратегией выживания представителей рода *Taxus* L., особи которых могут восстанавливаться, несмотря на кажущееся необратимое повреждение и разрушение.

Санитарное состояние популяции *Taxus cuspidata* в национальном парке "Удэгейская легенда" в целом можно считать удовлетворительным. Тревогу вызывает слабое развитие подроста, который в массе повреждается животными, несмотря на присутствие ядовитых веществ во всех органах этого растения. Охранный статус территории национального парка позволит сохранить для потомков многочисленную популяцию тиса, в составе которой выделяется Ковалевская тисовая роща, занимающая более 16 га и насчитывающая более 684 стволов (бассейн ключа Ковалевский).

Результаты нашего исследования показывают, что следует поддержать предложение В.В. Царалунга с соавторами [28], которые предлагают для более объективной оценки состояния деревьев учитывать их породные особенности. В обновленные "Правила санитарной безопасности в лесах" [20], утвержденные в 2020 г., были внесены изменения, а также добавлены дополнительные оценочные признаки, которые во многих случаях могут стать основными. В предыдущих "Правилах ...", принятых в 2017 г. [19], система оценок деревьев была упрощенной – в основном только по кроне, что неоднократно подвергалось критике [28, 29 и др.].

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа осуществлялась из средств федерального бюджета в рамках выполнения государственного задания (номер темы 121031000134-6) ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии" ДВО РАН. Авторы глубоко признательны за оказанную помощь в проведении полевых исследований сотрудникам национального парка "Удэгейская легенда": Наталье Крониковской, Александру Капитулину и Сергею Кавере.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wang Y.-F., Yu S.-H., Dong M., Zhang M.-L., Huo C.-H, Shi Q.-W.* 2010. Chemical Studies on *Taxus cuspidata*. – Chem. Biodiversity. 7(7): 1698–1716. https://doi.org/10.1002/cbdv.200800295
2. *Воробьев Д.П.* 1968. Дикорастущие деревья и кустарники Дальнего Востока. Л. 277 с.
3. *Колесников Б.П.* 1956. Конспект лесных формаций Приморья и Приамурья. В сб.: Академику В.Н. Сукачеву к 75-летию со дня рождения. М.; Л. С. 286–305.
4. *Katsuki T., Luscombe D.* 2013. *Taxus cuspidata*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T42549A2987373. https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42549A2987373.en
5. *Long T., Wu X., Wang Y., Chen J., Xu C., Li J., Zang R.* 2021. The population status and threats of *Taxus cuspidata*, a plant species with extremely small populations in China. – Global Ecol. Conservation. 26: e01495. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01495
6. *Wade E.M., Nadarajan J., Yang X., Ballesteros D., Sun W., Pritchard H.W.* 2016. Plant species with extremely small populations (PSESP) in China: A seed and spore biology perspective. – Plant Divers. 38(5): 209–220. https://doi.org/10.1016/j.pld.2016.09.002
7. *Колесников Б.П.* 1938. Растительность восточных склонов среднего Сихотэ-Алиня. В кн.: Труды Сихотэ-Алинского государственного заповедника. М. С. 25–208.
8. *Колесников Б.П.* 1935. О кустарниковой форме тиса остроконечного (*Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc. ex Endl.). В сб.: Вестн. ДВФ СО АН СССР. С. 31–45.
9. *Куренцова Г.Э.* 1964. Тис остроконечный и береза Шмидта в юго-западном Приморье. – В сб.: Охрана природы на Дальнем Востоке. Владивосток. С. 53–61.
10. *Присяжнюк Н.П.* 1986. Местообитания и состояние популяций *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc. ex Endl. в Лазовском заповеднике Приморского края. – Раст. ресурсы. 22(4): 487–492.
11. *Крониковская Н.Д.* 2020. Физико-географический очерк. В кн.: Биота и почвы национального парка "Удэгейская легенда". Владивосток. С. 12–36. https://doi.org/10.25221/udegelegend.2
12. *Крестов П.В.* 1993а. Редкие растительные сообщества в широколиственно-хвойном поясе бассейна реки Большая Уссурка (Средний Сихотэ-Алинь). – Бот. журн. 78(8): 107–115. http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19930808&rid=pdf_0005112
13. *Крестов П.В.* 1993б. Эколого-фитоценотическая характеристика лесов широколиственно-хвойного пояса среднего течения реки Большая Уссурка (Приморский край). – Бот. журн. 78(4): 116–122. http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19930404&rid=pdf_0005108
14. *Сибирина Л.А., Гладкова Г.А.* Леса. В кн.: Биота и почвы национального парка "Удэгейская легенда". Владивосток. С. 137–168. https://doi.org/10.25221/udegelegend.6

15. *Бутовец Г.Н., Гладкова Г.А.* 2020. Почвы. В кн.: Биота и почвы национального парка “Удэгейская легенда”. Владивосток. С. 42–67.
https://doi.org/10.25221/udegelegend.4
16. *Сибирина Л.А., Гладкова Г.А., Бутовец Г.Н., Крониковская Н.Д.* 2015. Реликтовый кедрово-елово-тисовый лес с лиственными породами в национальном парке “Удэгейская легенда”. – Вестн. ДВО РАН. 5: 70–77.
https://elibrary.ru/item.asp?id=24902906
17. *Заугольнова Л.Б., Ханина Л.Г.* 2004. Параметры мониторинга биоразнообразия лесов России на федеральном и региональном уровнях. – Лесоведение. 3: 3–14.
18. *ГОСТ Р* 57973-2017. Санитарная безопасность в лесах. Термины и определения.
https://docs.cntd.ru/document/1200157752
19. *О правилах* санитарной безопасности в лесах / Постановление Правительства РФ от 20 мая 2017 г. № 607
https://docs.cntd.ru/document/436736467
20. *Об утверждении* Правил санитарной безопасности в лесах / Постановление Правительства РФ от 09 декабря 2020 г. № 2047.
https://docs.cntd.ru/document/573053313
21. *Сибирина Л.А., Гладкова Г.А.* 2021. Тис-долгожитель (*Taxus cuspidata*) в национальном парке “Удэгейская легенда”. – Вестн. ДВО РАН. 2: 28–33.
https://doi.org/10.37102/0869-7698_2021_216_02_03
22. *Строгий А.А.* 1934. Деревья и кустарники Дальнего Востока, их лесоводственные свойства, использование и техническое применение. М.; Хабаровск. 235 с.
23. *Janeček V., Leugnerová G.* 2009. *Taxus cuspidata* reaction on the change of ecological condition on the locality Sichote Alin (Primorskyi region) – In: Ecology and diversity of forest ecosystems in the Asiatic part of Russia 2009. Proceedings of International Conference, 20.3 - 22.3.2009. Kostelec nad Černými lesy, Czech Republic: P. 22–25.
24. *Красная* книга Приморского края: Растения. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов. 2008. Владивосток. 688 с.
http://redbookpk.ru/index_plants.html
25. *Красная* книга Российской Федерации (растения и грибы). 2008. М. 855 с.
http://oopt.aari.ru/ref/38
26. *ГОСТ* 2140-81 Межгосударственный стандарт. Видимые пороки древесины.
http://docs.cntd.ru/document/1200004894
27. *Жуков А.М., Гниненко Ю.И., Жуков П.Д.* 2011. Опасные малоизученные болезни хвойных пород в лесах России. Пушкино. 104 с.
28. *Царалунга В.В., Царалунга А.В., Фурменкова Е.С.* 2016. Специфика диагностики состояния дерева дуба на основе визуальной оценки внешних признаков патологии. – Лесотехнический журн. 4(24): 120–126.
http://lestehjournal.ru/sites/default/files/journal_pdf/120-126.pdf
29. *Маслов А.Д.* 2009. Интегрированная оценка состояния деревьев. – В сб.: Изв. СПб лесотехнической академии. 187: 185–193.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13020143

# The State of *Taxus cuspidata* (Taxaceae) Coenopopulations in Udege Legend National Park (Primorye Territory)

**G. A. Gladkova[a], *, L. A. Sibirina[a]**

[a] *Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

**e-mail: Gladkova@biosoil.ru*

**Abstract**—The state of *Taxus cuspidata* (Japanese yew) population is assessed based on the data obtained during field studies in Udege Legend National Park. The most common types of trunk damages are indicated: bark injuries and drying cracks, tree-top dieback and hollows. The trees were categorized by health class according to the slightly adjusted current regulations. The legalized external pathological signs used for the tree health categorization are not always applicable for the red-listed species *T. cuspidata*. Specifically, the color of its needles has had little to no dependence on the tree health class. The pathological characteristics detected in the Japanese yew most often do not lead to tree death, thus few declining trees have been observed. Trees with broken and rotten trunks do not lose their viability, and can continue growing being pressed down. *T. cuspidata* is characterized by an almost complete absence of wood decay fungi fruiting bodies.

*Keywords: Taxus cuspidata*, Primorye Territory, Bolshaya Ussurka River, diagnostic signs, assessment of the sanitary condition of trees, population

## ACKNOWLEDGMENTS

The research was funded by the federal budget within the framework of the state research assignment to the Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity of the Far Eastern Branch RAS. The authors are deeply grateful for the assistance provided in conducting field research to Natalia Kronikovskaya, Alexander Kapitulin and Sergey Kavera of Udege Legend National Park.

## REFERENCES

1. *Wang Y.-F., Yu S.-H., Dong M., Zhang M.-L., Huo C.-H, Shi Q.-W.* 2010. Chemical Studies on *Taxus cuspidata*. – Chem. Biodiversity. 7(7): 1698–1716. https://doi.org/10.1002/cbdv.200800295
2. *Vorobjov D.P.* 1968. [Wild trees and shrubs of the Far East]. St. Petersburg. 277 p. (In Russian)
3. *Kolesnikov B.P.* 1956. [Synopsis of forest formations of the Primorye and the Amur regions]. – In: [To the Academy member V.N. Sukachev on the 75th anniversary of his birth]. Moscow; St. Petersburg. P. 286–305. (In Russian)
4. *Katsuki T., Luscombe D.* 2013. *Taxus cuspidata*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T42549A2987373. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42549A2987373.en
5. *Long T., Wu X., Wang Y., Chen J., Xu C., Li J., Zang R.* 2021. The population status and threats of *Taxus cuspidata*, a plant species with extremely small populations in China. – Global Ecol. Conservation. 26: e01495. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01495
6. *Wade E.M, Nadarajan J., Yang X., Ballesteros D., Sun W., Pritchard H.W.* 2016. Plant species with extremely small populations (PSESP) in China: A seed and spore biology perspective. – Plant Divers. 38(5): 209–220. https://doi.org/10.1016/j.pld.2016.09.002
7. *Kolesnikov B.P.* 1938. [Vegetation of the eastern slopes of the middle Sikhote-Alin]. – In: [Proceedings of the Sikhote-Alin State Reserve]. Moscow. P. 25–208. (In Russian)
8. *Kolesnikov B.P.* 1935. On the shrubby form of Japanese yew (*Taxus cuspidata* S. et Z.). – Vestnik FEB AS USSR. 13: 31–45. (In Russian)
9. *Kurentsova G.E.* 1964. [Japanese yew and Schmidt's birch in the South-Western Primorye]. – In: [Nature protection in the Far East]. Vladivostok. P. 53–61. (In Russian)
10. *Prisyazhnyuk N.P.* 1986. [Habitats and population status of *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc. ex Endl. in the Lazovsky nature reserve of Primorsky Krai]. – Rastitelnye resursy. 22(4): 487–492. (In Russian)
11. *Kronikovskaya N.D.* 2020. [Physico-geographical essay]. – In: Biota and soils of the "Udege Legend" National Park. P. 12–36. https://doi.org/10.25221/udegelegend.2 (In Russian)
12. *Krestov P.V.* 1993a. Rare plant communities in the broad-leaved-coniferous belt of the Bolshaya Ussurka River basin (Middle Sikhote-Alin). – Botanicheskii Zhurnal. 78(8): 107–115. http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19930808&rid=pdf_0005112 (In Russian)
13. *Krestov P.V.* 1993b. Ecological and phytocoenotical characteristics of the broad-leaved-coniferous forest belt in the middle of Bolshaya Ussurka River (Primorsky region). – Botanicheskii Zhurnal. 78(4): 116–122. http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19930404&rid=pdf_0005108 (In Russian)
14. *Sibirina L.A., Gladkova G.A.* [Forests]. – In: Biota and soils of the "Udege Legend" National Park. P. 137–168. https://doi.org/10.25221/udegelegend.2 (In Russian)
15. *Butovets G.N., Gladkova G.A.* [Soils]. – In: [Biota and soils of the "Udege legend" national park]. P. 42–67. https://doi.org/10.25221/udegelegend.2 (In Russian)
16. *Sibirina L.A., Gladkova G.A., Butovets G.N., Kronikovskaya N.D.* 2015. Relic mixed broadleaved forest with Korean pine, Jeddo spruce and Japanese yew in the national park "The Udege Legend". – Vestnik of FEB RAS. 5: 70–77. https://elibrary.ru/item.asp?id=24902906 (In Russian)
17. *Zaugol'nova L.B., Khanina L.G.* 2004. Parameters of monitoring of forest biodiversity at the national and regional levels in Russia. – Lesovedenie. 3: 3–14. https://elibrary.ru/item.asp?id=17635446 (In Russian)
18. [*GOST* R 57973-2017. Sanitary safety in forests. Terms and definitions]. https://docs.cntd.ru/document/1200157752 (In Russian)
19. [*Resolution* of the Government of the Russian Federation No. 607 of May 20, 2017 "On the rules of sanitary safety in forests"]. https://docs.cntd.ru/document/436736467 (In Russian)
20. [*Resolution* of the Government of the Russian Federation No. 2047 of December 09, 2020 "Rules of sanitary safety in forests"]. https://docs.cntd.ru/document/573053313 (In Russian)
21. *Sibirina L.A., Gladkova G.A.* 2021. The long-lived yew (*Taxus cuspidata*) in the National park "Udege Legend". – Vestnik of Far Eastern Branch RAS. 2: 28–33. https://doi.org/10.37102/0869-7698_2021_216_02_03 (In Russian)

22. *Strogij A.A.* 1934. [Trees and shrubs of the Far East: properties and technical use]. Moscow; Khabarovsk. 235 p. (In Russian)
23. *Janeček V., Leugnerová G.* 2009. *Taxus cuspidata* reaction on the change of ecological condition on the locality Sichote Alin (Primorskyi region) – In: Ecology and diversity of forest ecosystems in the Asiatic part of Russia 2009. Proceedings of International Conference, 20.3–22.3.2009. Kostelec nad Černými lesy, Czech Republic. P. 22–25.
24. [*The Red* Data Book of the Primorsky Territory: Plants. Rare and endangered species of plants and fungi]. 2008. Vladivostok. 688 p.
http://redbookpk.ru/index_plants.html (In Russian)
25. [*The Red* Data Book of the Russian Federation (plants and fungi)]. 2008. Moscow. 855 p.
http://oopt.aari.ru/ref/38 (In Russian)
26. [*GOST* 2140-81. Interstate standard. Visible defects of wood. Classification, terms and definitions, methods of measurement]. http://docs.cntd.ru/document/1200004894 (In Russian)
27. *Zhukov A.M., Gninenko Yu.I., Zhukov P.D.* 2011. Hazardous understudied coniferous diseases in Russian forests. Pushkino. 104 p.
28. *Tsaralunga V.V., Tsaralunga A.V., Furmenkova E.S.* 2016. Specifics of diagnosis of oak wood condition based on visual assessment of external signs of pathology. – Lesotekhnicheskii Zhurnal. 4(24): 120–126.
http://lestehjournal.ru/sites/default/files/journal_pdf/120-126.pdf (In Russian)
29. *Maslov A.D.* 2009. [Tree state integrated assessment]. – Izvestia Sankt-Petersburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii. 187: 185–193.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13020143 (In Russian)

**EDN:** SKDKTS
*РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, 2022, том 58, вып. 2, с. 135–143*

## БИОЛОГИЯ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ

# СЕМЕННАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ *CALTHA PALUSTRIS* (RANUNCULACEAE) *IN SITU* И *EX SITU* НА УЧАСТКАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО СИБИРСКОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА

**© 2022 г. Т. И. Фомина***
*Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, г. Новосибирск, Россия*
**e-mail: fomina-ti@yandex.ru*

Поступила в редакцию 21.01.2022 г.
После доработки 25.02.2022 г.
Принята к публикации 03.03.2022 г.

В Центральном сибирском ботаническом саду (Новосибирск) изучена семенная продуктивность алтайского, горно-алтайского, кемеровского и петербургского образцов гигрогелофита *Caltha palustris* L. в сравнении с растениями из природных популяций – горно-алтайской и местной. Установлено, что на побеге калужницы формируется в среднем 3–6 плодов, каждый из которых состоит в среднем из 8–12 листовок. Потенциальная семенная продуктивность *C. palustris* высокая – от 52 до 260 семязачатков на многолистовку. Реальная семенная продуктивность варьирует от нескольких до 132 семян на плод, тогда как их число на листовку составляет в среднем 2–10 шт. Условно-реальная семенная продуктивность, как в естественных местообитаниях, так и при интродукции, близка к реальной, что свидетельствует о деградации семязачатков у вида на ранних этапах формирования семян. Масса семян с 1 плода наибольшая у растений местной популяции и достигает в среднем 37 мг. Все показатели семенной продуктивности существенно выше у особей *in situ*, за исключением алтайского образца. Вариабельность показателей, как правило, очень высокая и в культуре обусловлена, прежде всего, происхождением образца. Полученные данные показывают возможность семенного размножения *C. palustris* в неоптимальных для этого вида условиях лесостепи, на фоне тенденции изменения климатических условий вегетационного периода в Новосибирске в сторону повышения температур и усиления сухости.

*Ключевые слова: Caltha palustris*, семенная продуктивность, природные популяции, интродукционные образцы, лесостепь, Западная Сибирь

**DOI:** 10.31857/S0033994622020066

Изменения гидрологического режима в условиях потепления климата влияют на распространение и жизненное состояние водно-болотных растений. Одним из исследуемых объектов является калужница болотная – *Caltha palustris* L. Это циркумбореальный вид, гигрогелофит, произрастающий в холодных и умеренно-теплых районах по берегам водоемов, болотам, заболоченным лугам и лесам. Ареал включает Европу, Казахстан, Монголию, Китай, Корею, Японию, Северную Америку, в пределах России – Европейскую часть, Сибирь, Дальний Восток [1]. Вид редкий в Восточной Европе [2], Украине, Молдове, Крыму, Ростовской области и Москве [3]. Известен как лекарственное, пищевое, декоративное растение.

Различные части калужницы издавна используются в этномедицине при кожных и нервных заболеваниях, ревматизме, бронхите, в качестве спазмолитического и ранозаживляющего средства. Лечебные свойства растения обусловлены содержанием алкалоидов, тритерпеновых сапонинов, дубильных веществ, каротиноидов [4]. Трава богата фенольными соединениями, при этом из флавоноидов доминирует апигенин, оказывающий седативное и мощное антиканцерогенное действие [5]. Из-за присутствия протоанемонина, растение в свежем виде слабо ядовито и имеет горький вкус, исчезающий при варке. Листья калужницы употребляются в пищу в Тибетском Китае и Турции [6, 7]. Культивируется как раноцветущий декоративный многолетник, в основном для озеленения прибрежной зоны водоемов [8, 9]. Показано, что в составе водно-болотных ценозов вид играет важную роль в аккумуляции макро- и микроэлементов, особенно Mg, Ca, Sr, Fe, поэтому может применяться в мероприятиях по фиторемедиации [10, 11].

*C. palustris* L. отличается высоким полиморфизмом, включая форму и размер розеточных ли-

стьев, цветков, зрелых листовок, структуру побега. В пределах популяции модификации вегетативных и флоральных признаков имеют характер непрерывной изменчивости, обусловленной различиями в условиях произрастания [12]. При этом вид весьма пластичен, способен адаптироваться к широкому диапазону местообитаний. Имеются сведения, что в культуре наибольшие различия по морфологическим признакам и семенной продуктивности у калужницы болотной связаны с происхождением популяций [13].

Для прогнозирования поведения гигрофильного вида при изменении климата представляет интерес его интродукция в неоптимальные условия культуры и сравнение показателей семенного размножения *in situ* и *ex situ*. Имеются сведения, что при переносе в более сухие условия, например, с пойменного луга на пастбище растения калужницы выживали, однако отмечалось неуклонное снижение их численности и уровня жизненности (уменьшились размеры и количество листьев, цветков, а также частота цветения) [14]. При этом наблюдался эффект запаздывания реакции на неблагоприятные условия в течение трех лет, что свидетельствует о высоком адаптационном потенциале вида. Ранее [15] показано, что растения калужницы на дренированных участках способны существовать длительно (не менее 14 лет), но численность популяции не увеличивается.

Известно, что потенциальная продуктивность особи *C. palustris* в естественных ценозах достигает 1560 семязачатков, а реальная – 1300 семян [16]. Плод – сухая спиральная многолистовка. Число листовок на плод варьирует в зависимости от эколого-фитоценотических условий, тогда как число семян на листовку достаточно стабильно [13].

Цель исследования состояла в оценке показателей семенного размножения *C. palustris* в связи с перспективами культивирования в условиях лесостепи Западной Сибири.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено в Центральном сибирском ботаническом саду (ЦСБС СО РАН, г. Новосибирск), в коллекции декоративных растений природной флоры. Интродукционные образцы *C. palustris* в числе нескольких особей получены из природных популяций, находящихся в следующих пунктах: Кемеровская область, Таштагольский район, пихтово-березовый лес (2010); Алтайский край, Целинный район, русло ручья на дне балки (2017); Горно-алтайский ботанический сад, берег р. Семы (2017) и окрестности г. Санкт-Петербурга, смешанный лес (2018). В коллекции калужница выращивалась на участках с естественным увлажнением, притененных высокорослыми многолетниками.

Природными популяциями, в которых исследована семенная продуктивность, являлись: горно-алтайская в окрестностях с. Камлак и местная, произрастающая на территории Центрального сибирского ботанического сада по берегам озера и в пойме р. Зырянка.

Сбор данных проводили в период 2016–2021 гг. Используя общепринятые методики [17], изучали следующие показатели семенной продуктивности: число листовок на плод; число семязачатков на листовку и плод (ПСП); число завязавшихся семян на листовку и плод, включая полноценные и щуплые (УРСП); число зрелых выполненных семян на листовку и плод (РСП); массу семян с 1 плода. Завязываемость оценивали в процентах листовок, содержащих семена (выполненные и щуплые), от общего числа исследованных листовок. Объемы выборок включали 10–70 определений для одной репродукции в зависимости от признака. Данные обработаны с использованием параметров описательной статистики. Вариабельность признаков рассматривали как низкую (при $C_v$ = 0–10%), среднюю (при $C_v$ = 11–20%) или высокую (при $C_v$ > 20%) [18].

В табл. 1 приведены показатели температуры воздуха и осадков в Новосибирске в период цветения и плодоношения калужницы[1]. Среднемесячная температура апреля в годы исследования значительно превышала климатическую норму, а количество осадков за месяц уменьшилось (за исключением 2016 г.), последние три года – в 2–3 раза. Май в 2018 г. выдался холодным, в остальные годы был теплее нормы, особенно в 2020 и 2021 гг. Условия увлажнения сильно варьировали, от избыточно влажных в 2018 г. до засушливых в 2021 г. Июнь по температурным показателям в 2016–2018 гг. характеризовался как теплый, в 2019–2021 гг. приближался к норме. По количеству осадков в этом месяце сезоны разделились на влажные (2017, 2018, 2021 гг.) и сухие. В целом период исследования отличался значительным колебанием климатических показателей, отражая общую тенденцию изменения условий вегетационного периода в Новосибирске – повышения теплообеспеченности и усиления сухости [19].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*C. palustris* – травянистый поликарпик с ранневесенне-цветущим летне-зеленым феноритмотипом. В условиях Новосибирска растения отрастают в третьей декаде апреля, за исключением алтай-

[1] https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Огурцово

**Таблица 1.** Характеристика погодных условий в Новосибирске в период цветения и плодоношения *Caltha palustris*
**Table 1.** Weather conditions in Novosibirsk during *Caltha palustris* flowering and fruiting periods

| Месяц/Год<br>Month/Year | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | Климатическая норма<br>Climate normal |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Апрель<br>April | 7.2/35 | 4.7/22 | 3.4/22 | 3.8/12 | 8.2/8 | 3.3/11 | 1.5/24 |
| Май<br>May | 10.4/31 | 12.6/33 | 7.0/82 | 10.9/43 | 15.5/54 | 14.3/25 | 10.3/36 |
| Июнь<br>June | 19.7/37 | 19.4/71 | 19.1/71 | 16.4/26 | 16.6/24 | 16.2/73 | 16.7/58 |

Примечание. Над чертой – среднесуточная температура воздуха, °C; под чертой – осадки, мм.
Note. The numerator is the average daily air temperature, °C; and the denominator is precipitation, mm.

**Таблица 2.** Семенная продуктивность *Caltha palustris in situ* и *ex situ*
**Table 2.** *In situ* and *ex situ* seed productivity of *Caltha palustris*

| Образец<br>Accession | Число листовок на плод<br>Number of follicles per fruit | Число семян<br>Number of seeds | | Масса семян с 1 плода, мг<br>Seed weight per fruit, mg |
|---|---|---|---|---|
| | | на плод<br>per fruit | на листовку<br>per follicle | |
| Алтайский<br>Altai | 9.1 ± 0.3[1]/11.9 | 60.2 ± 10.8/61.9 | 7.1 ± 0.4/52.6 | 15.5 ± 3.1/69.6 |
| Кемеровский<br>Kemerovo | 7.6 ± 0.3/31.2 | 12.8 ± 1.4/67.8 | 2.4 ± 0.2/53.2 | 8.9 ± 1.6/87.8 |
| Горно-алтайский<br>Mountainous Altai | 9.9 ± 0.4/18.5 | 5.8 ± 1.4/106.5 | 1.6 ± 0.15/2.9 | – |
| Горно-алтайский*<br>Mountainous Altai* | 12.1 ± 0.6/26.9 | 122.1 ± 12.3/52.4 | 10.1 ± 0.34/0.1 | – |
| Местный*<br>Novosibirsk* | 9.9 ± 0.4/32.2 | 58.4 ± 5.3/54.3 | 5.3 ± 0.2/62.5 | 36.9 ± 3.7/44.4 |
| Петербургский<br>Saint Peterburg | 9.8 ± 0.5/20.6 | 36.8 ± 3.4/41.1 | 4.1 ± 0.2/53.6 | 18.9 ± 1.9/42.8 |

Примечание: * Образец *in situ*; [1] над чертой – средняя арифметическая и ошибка, под чертой – коэффициент вариации, %.
Note. * Accession *in situ*; [1] the numerator is the arithmetic mean and error, the denominator is the coefficient of variation, %.

ского образца (в среднем 6 мая). Фаза цветения у образцов различного происхождения наступает в разные сроки, в период с конца апреля (кемеровский) до третьей декады мая (горно-алтайский). Длительность цветения значительно варьирует, составляя 12 ± 1 дней для алтайских особей и 31 ± 8 дней для местной популяции. В естественных ценозах из-за варьирования микроусловий наблюдается разновременность фенодат отрастания и бутонизации, поэтому цветение популяции гораздо продолжительнее, чем на выравненном агрофоне в коллекции. Период от начала цветения до растрескивания листовок длится 35–47 дней.

Показатели семенной продуктивности при смене условий местообитания растений наряду с фенологическими явлениями отражают специфику адаптации к новой среде [20]. Для видов, способных к семенному размножению, важным маркером служит количество и качество проду-

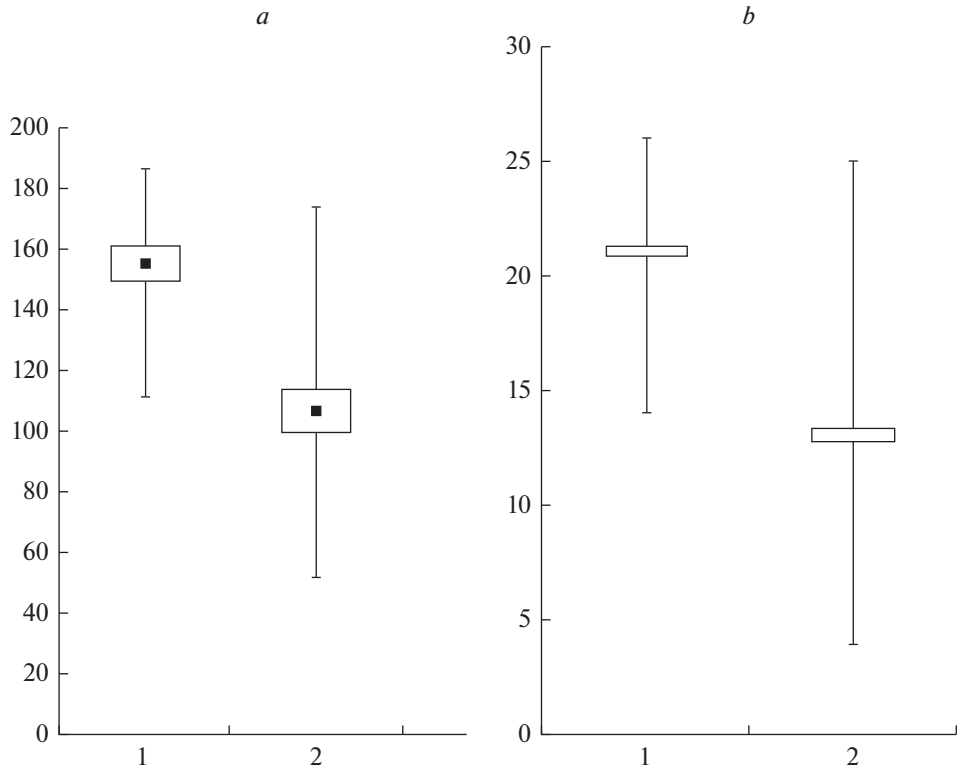



**Рис. 1.** Потенциальная семенная продуктивность *Caltha palustris* (2017 г.).
*По горизонтали:* 1 – кемеровский образец; 2 – местная популяция; *по вертикали: a* – число семязачатков на плод, *b* – число семязачатков на листовку.
**Fig. 1.** Potential seed productivity of *Caltha palustris* (2017).
*X-axis:* 1 – Kemerovo accession; 2 – Novosibirsk population; *y-axis*: *a* – a number of ovules per fruit, *b* – a number of ovules per follicle.

цируемых семян, а также сравнение уровня продуктивности растений в природных популяциях и в культуре. По данным K. Faliňska [13], число семян у *C. palustris* варьирует в пределах 40–100 шт. на плод в зависимости от числа листовок в нем (от 2 до 10), тогда как число семян на листовку относительно стабильно и составляет 10–15 шт. Различия образцов по семенной продуктивности обусловлены различиями экотопов, в которых они произрастали. В сообществах пойменных лугов плод калужницы включает 12–13 листовок, в каждой из которых созревает 9–18 семян (в среднем 12) [16].

По нашим наблюдениям, на побеге калужницы формируется в среднем 3–6 плодов. Число листовок в плоде варьирует в диапазоне 4–20 с наибольшими значениями в природных популяциях, а в среднем составляет от 7 до 12 шт. (табл. 2). Число семязачатков на листовку и плод (ПСП) *in situ* и *ex situ* существенно различаются. Для кемеровского образца средние значения этих показателей в полтора раза выше, чем для растений местной популяции (рис. 1*a*, 1*b*). У последних образуется до 18 плодов на побеге (у кемеровских максимум 8), многолистовки состоят из большего числа плодиков, поэтому реализация на единицу продуктивности гораздо ниже. При этом вариабельность числа семязачатков на плод и листовку у местных растений высокая (31.8 и 28.9% соответственно), вдвое превышает среднюю величину изменчивости для кемеровского образца. По максимальным значениям ПСП на плод и листовку у особей в природной среде и в культуре различия не столь значительные. В целом потенциальная плодовитость *C. palustris* высокая – от 52 до 260 семязачатков на многолистовку.

Число зрелых выполненных семян на листовку и плод (РСП) в естественных местообитаниях выше, чем у интродукционных образцов (рис. 2). Показатели сильно варьируют в зависимости от происхождения растений и условий вегетационного периода, причем реакция различных образцов неодинакова. В культуре лишь алтайские растения сопоставимы по уровню семенной продуктивности с местной популяцией. Петербургский образец продуцирует заметно меньше семян, наи-

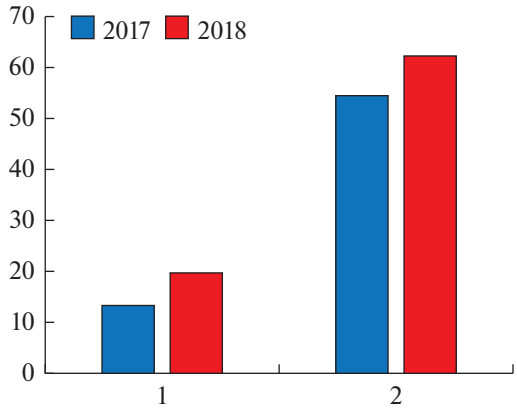



**Рис. 2.** Реальная семенная продуктивность *Caltha palustris in situ* и *ex situ*.
*По горизонтали:* 1 – кемеровский образец; 2 – местная популяция; *по вертикали:* число семян на плод.
**Fig. 2.** Real seed productivity of *Caltha palustris in situ* и *ex situ*.
*X-axis:* 1 – Kemerovo accession; 2 – Novosibirsk population; *y-axis*: a number of seeds per fruit.

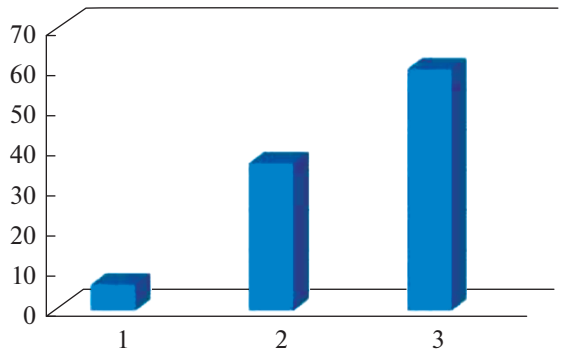



**Рис. 3.** Реальная семенная продуктивность различных образцов в культуре (2021 г.).
*По горизонтали:* 1 – кемеровский, 2 – петербургский, 3 – алтайский; *по вертикали:* число семян на плод.
**Fig. 3.** Real seed productivity of different accessions under cultivation (2021).
*X-axis:* 1 – Kemerovo, 2 – St. Peterburg, 3 – Altai; *y-axis*: a number of seeds per fruit.

более низкой семенной продуктивностью отличаются горно-алтайский и кемеровский образцы (табл. 2). Высокая внутривидовая изменчивость показателя отчетливо проявилась на фоне засухи весной 2021 г. (рис. 3).

Поразительное различие по величине РСП для горно-алтайских растений *in situ* и *ex situ* обусловлено резкой сменой местообитания при переносе из влажных и прохладных условий берега горной реки в гораздо более сухие и теплые условия лесостепи. То же относится к кемеровскому образцу, обитающему под пологом пихтово-березового леса, коэффициент продуктивности (РСП/ПСП) которого в культуре колеблется в пределах 9.0–17.1%.

Число семян широко варьирует: от нескольких до 115 шт. на плод у интродукционных образцов и до 132 шт. – в природных популяциях. В листовке формируется максимально до 12–14 и 17–19 семян соответственно, в среднем 2–10 шт. (табл. 2). Масса семян с 1 плода также значительно варьирует, достигая 37 мг в среднем у растений местной популяции. При интродукции значения показателя гораздо меньше: минимум (~9 мг) у кемеровских особей и максимум (~19 мг) – у петербургских.

Важным показателем семенного размножения является число завязавшихся семян на листовку и плод (УРСП) как отражение уровня реализации репродуктивного потенциала вида в конкретных условиях произрастания. У исследованных образцов этот показатель включает выполненные и недоразвитые (щуплые) семена. Характерно, что количество щуплых семян на момент созревания плодов калужницы *in situ* и *ex situ* невелико, т.е. разрыв между РСП и УРСП незначительный (рис. 4) при учете продуктивности по листовкам, содержащим выполненные и (или) щуплые семе-

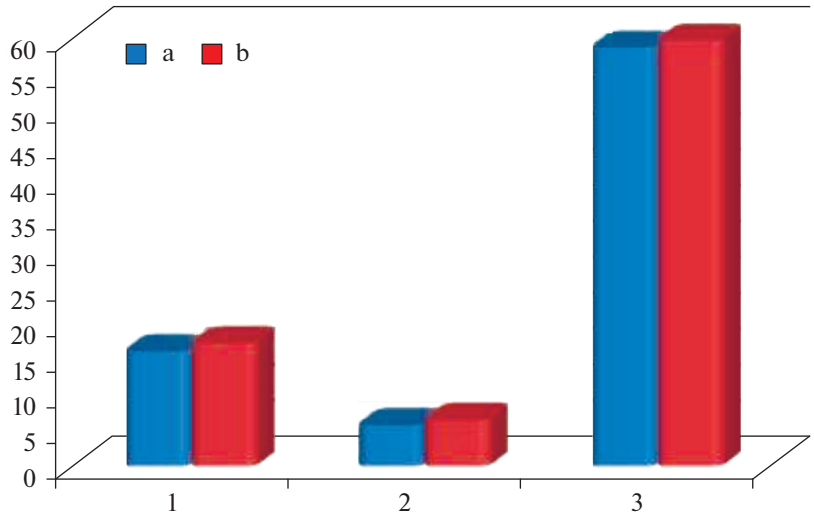



**Рис. 4.** Соотношение реальной и условно-реальной семенной продуктивности у *Caltha palustris in situ* и *ex situ* (2016–2019 гг.).
*По горизонтали:* 1 – кемеровский образец, 2 – горно-алтайский образец, 3 – местная популяция; *по вертикали:* число зрелых выполненных семян (*a*) и завязавшихся семян (*b*) на плод.
**Fig. 4.** The ratio of real and conditionally real seed productivity for *Caltha palustris in situ* и *ex situ* (2016–2019).
*X-axis:* 1 – Kemerovo accession, 2 – St. Peterburg accession, 3 – Novosibirsk population; *y-axis*: a number of mature full seeds (*a*) and set seeds (*b*) per fruit.

на. Однако, завязываемость семян существенно различается в природе и культуре. В горно-алтайской популяции она очень высокая, в местной – более 80%. При интродукции завязываемость зависит от происхождения образца и погодных факторов. В итоге часть листовок формируется без семян. У алтайского и петербургского образцов в условиях резкого дефицита влаги в 2021 г. завязываемость семян была высокой, тогда как у кемеровского – всего 56.2%. Горно-алтайский образец не цвел, а в сезон 2019 г. с менее засушливыми условиями завязываемость составляла 40.2%.

Анализ полученных данных показывает, что у *C. palustris* в неоптимальных условиях существования деградация семязачатков происходит на ранних этапах их развития. Об этом свидетельствуют крайне вариабельный показатель завязываемости семян и невысокая доля щуплых семян. Известно, что среди видов с многосеменными плодами весьма распространен феномен аберрации семязачатков. Одной из вероятных причин является перераспределение питательных веществ в пользу развивающихся семян, что служит фактором адаптации к неблагоприятной среде [21]. Семенная продуктивность калужницы в культуре по всем показателям значительно ниже, чем в природных популяциях. Тем не менее, семенное размножение вида возможно, поскольку все интродукционные образцы способны продуцировать полноценные семена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Центральном сибирском ботаническом саду (ЦСБС СО РАН, г. Новосибирск) исследована семенная продуктивность *Caltha palustris* L. в 2 природных популяциях (горно-алтайской и местной) и у 4 интродукционных образцов (алтайского, горно-алтайского, кемеровского и петербургского). Число семян на плод и листовку *in situ* характеризуют калужницу болотную как вид с высокой способностью к семенному размножению. В неоптимальных условиях произрастания в коллекции ботанического сада продуктивность особей существенно снижается. Кроме того, все показатели отличаются крайне высокой вариабельностью в зависимости от происхождения образца и погодных условий сезона.

Среди изученных образцов по уровню семенной продуктивности с местной популяцией сопоставим лишь алтайский образец. Кемеровский и, особенно, горно-алтайский образцы значительно уступают местным растениям, вероятно, из-за резкой смены условий местообитания при переносе в культуру. Вегетационные периоды лет исследования значительно различались по климатическим показателям, но в целом отражали основную тенденцию изменения климата Новосибирска в сторону повышения температур и сокращения осадков. Полученные данные показывают, что и в этих условиях растения гигрофильного вида *C. palustris* продуцируют семена в

количестве, достаточном для их размножения и поддержания в культуре.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания по проекту АААА-А21-121011290025-2 "Оценка морфогенетического потенциала популяций растений Северной Азии экспериментальными методами". При подготовке статьи использовались материалы Биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН, УНУ "Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте", USU 440534.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Flora* of Siberia. 2003. Vol. 6. Portulacaceae–Ranunculaceae. Enfield. 312 p.
2. *Biró E., Babai D., Bódis J., Molnár Z.* 2014. Lack of knowledge or loss of knowledge? Traditional ecological knowledge of population dynamics of threatened plant species in East-Central Europe. – J. Nat. Conserv. 22(4): 318–325. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2014.02.006
3. *Красные* книги / ООПТ России. oopt.aari.ru/rbdata
4. *Растительные* ресурсы СССР: Цветковые растения, их химический состав, использование; Семейства Magnoliaceae–Limoniaceae. 1984. Л. 460 с.
5. *Мартынов А.М., Дул В.Н., Даргаева Т.Д., Чупарина Е.В.* 2017. Изучение химического состава травы калужницы болотной (*Caltha palustris* L.). – Вопросы обеспечения качества лекарственных средств. 4(18): 66–71. http://www.humanhealth.ru/images/conference/Jurnal_N_18.pdf
6. *Kang Y., Łuczay Ł., Kang J., Wang F., Hou J., Guo Q.* 2014. Wild food plants used by the Tibetans of Gongba Valley (Zhouqu county, Gansu, China). – J. Ethnobiol. Ethnomed. 10(1): 20. https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-20
7. *Çakir E.A.* 2017. Traditional knowledge of wild edible plants of Iğdir Province (East Anatolia, Turkey). – Acta Soc. Bot. Pol. 86(4): 3568. https://doi.org/10.5586/asbp.3568
8. *Полетико О.М., Мишенкова А.П.* 1967. Декоративные травянистые растения открытого грунта: Справочник по номенклатуре родов и видов. Л. 208 с.
9. *Иллюстрированная* энциклопедия растительного мира Сибири. 2009. Новосибирск. 387 с.
10. *Parzych A., Jonczak J., Sobisz Z.* 2017. Bioaccumulation of macronutrients in herbaceous plants of mid-forest spring niches. – Balt. For. 23(2): 384–393. https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2017-23%5B2%5D/Baltic%20Forestry%202017.2_384-393.pdf
11. *Parzych A., Jonczak J.* 2018. Bioaccumulation of macro- and microelements in herbaceous plants in the river valley. – JEE. 19(3): 170–177. https://doi.org/10.12911/22998993/86157
12. *Woodell S.R.J., Kootin-Sanwu M.* 1971. Intraspecific variation in *Caltha palustris*. – New Phytol. 70(1): 173–186. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1971.tb02522.x
13. *Faliňska K.* 1981. Variability of *Caltha palustris* L. populations in garden culture. – Acta Soc. Bot. Pol. 50(3): 493–513. https://doi.org/10.5586/asbp.1981.072
14. *Brotherton S., Joyce C.B., Berg M.J., Awcock G.J.* 2019. Immediate and lag effects of hydrological change on floodplain grassland plants. – Plant Ecol. 220(3): 345–359. https://doi.org/10.1007/s11258-019-00918-z
15. *Grootjans A.P., Fresco L.F.M., de Leeuw C.C., Schipper P.C.* 1996. Degeneration of species-rich *Calthion palustris* hay meadows; some considerations on the community concept. – J. Vegetation Sci. 7(2): 185–194. https://doi.org/10.2307/3236318
16. *Барыкина Р.П., Чубатова Н.В.* 2000. Калужница болотная. – В кн.: Биологическая флора Московской области. Вып. 14. М. С. 87–100.
17. *Сацыперова И. Ф.* 1993. Основные аспекты и методы изучения репродуктивной биологии травянистых растений при их интродукции. – В кн.: Проблемы репродуктивной биологии семенных растений. СПб. С. 25–35.
18. *Зайцев Г.Н.* 1973. Методика биометрических расчетов. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М. 256 с.
19. *Воронина Л.В., Гриценко А.Г.* 2011. Климат и экология Новосибирской области. Новосибирск. 228 с.
20. *Адаптация* и изменчивость древесных растений в лесной зоне Евразии. 1993. Екатеринбург. 137 с.
21. *Шамров И.И.* 2020. Факторы снижения семенной продуктивности у цветковых растений. – Раст. ресурсы. 2020. 56(1): 4–15. https://doi.org/10.31857/s0033994620010057

# Seed Productivity of *Caltha palustris* (Ranunculaceae) *in situ* and *ex situ* at the Plots of the Central Siberian Botanical Garden

**T. I. Fomina***

*Central Siberian Botanical Garden SB RAS, Novosibirsk, Russia*

**e-mail: fomina-ti@yandex.ru*

**Abstract**—The seed productivity of the hygro-helophyte *Caltha palustris* L. under cultivation in the Central Siberian Botanical Garden (Altai, Mountainous Altai, Kemerovo, and St. Petersburg accessions) was studied and compared with natural Mountainous Altai and Novosibirsk populations. It was found that one marsh marigold shoot bears 3–6 fruits with 4–20 follicles on average. The potential seed productivity of the species is high, varying from 52 to 260 ovules per fruit. The real seed productivity varies from several to 132 seeds per fruit, while their number per follicle averages 2–10 pcs. The values of conditionally real and real seed productivity are close both in natural habitats and under cultivation, indicating the degradation of ovules at the early stages of seed formation. The single fruit seed weight is highest in Novosibirsk population, reaching 40 mg on average. All indicators of seed productivity are significantly higher *in situ*, except for the Altai accession. The seed productivity indicators tend to be highly variable, and in culture, these are primarily due to the accession provenance. The data demonstrate the possibility of seed reproduction of *C. palustris* under nonoptimal conditions of the forest-steppe, amid the rising temperatures and reduced precipitation during the growing season in Novosibirsk.

*Keywords: Caltha palustris*, seed productivity, natural populations, cultivated accessions, forest-steppe, Western Siberia

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the framework of the state assignment AAAA21-121011290025-2 under the project "Assessment of the morphogenetic potential of plant populations in Northern Asia by experimental methods". In preparing the article, the materials of the Bioresource Scientific Collection of the Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, UNU "Collections of living plants in open and closed ground", USU 440534 were used.

## REFERENCES

1. *Flora* of Siberia. 2003. Vol. 6. Portulacaceae–Ranunculaceae. Enfield. 312 p.
2. *Biró E., Babai D., Bódis J., Molnár Z.* 2014. Lack of knowledge or loss of knowledge? Traditional ecological knowledge of population dynamics of threatened plant species in East-Central Europe. – J. Nat. Conserv. 22(4): 318–325. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2014.02.006
3. [*Red Data Books* / Specially Protected Natural Territories of Russia]. oopt.aari.ru/rbdata
4. [*Plant* resources of the USSR: Flowering plants, their chemical composition, use; Magnoliaceae–Limoniaceae families]. 1984. Leningrad. 460 p. (In Russian)
5. *Martynov A.M., Dul V.N., Dargaeva T.D., Chuparina Ye.V.* 2017. Study of chemical composition of Marsh Marigold grass (*Caltha palustris* L.). – J. Pharmaceuticals Quality Assurance Issues. 4(18): 66–71. http://www.humanhealth.ru/images/conference/Jurnal_N_18.pdf (In Russian)
6. *Kang Y., Łuczay Ł., Kang J., Wang F., Hou J., Guo Q.* 2014. Wild food plants used by the Tibetans of Gongba Valley (Zhouqu county, Gansu, China). – J. Ethnobiol. Ethnomed. 10(1): 20. https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-20
7. *Çakir E.A.* 2017. Traditional knowledge of wild edible plants of Iğdir Province (East Anatolia, Turkey). – Acta Soc Bot Pol. 86(4): 3568. https://doi.org/10.5586/asbp.3568
8. *Poletiko O.M., Mishenkova A.P.* 1967. [Ornamental herbaceous plants in open ground: A reference book on the nomenclature of genera and species]. Leningrad. 208 p. (In Russian)
9. [*Illustrated* encyclopedia of plant life of Siberia]. 2009. Novosibirsk. 387 p. (In Russian)
10. *Parzych A., Jonczak J., Sobisz Z.* 2017. Bioaccumulation of macronutrients in herbaceous plants of mid-forest spring niches. – Balt For. 23(2): 384–393. https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2017-23%5B2%5D/Baltic%20Forestry%202017.2_384-393.pdf
11. *Parzych A., Jonczak J.* 2018. Bioaccumulation of macro- and microelements in herbaceous plants in the river valley. – JEE. 19(3): 170–177. https://doi.org/10.12911/22998993/86157

12. *Woodell S.R.J., Kootin-Sanwu M.* 1971. Intraspecific variation in *Caltha palustris*. – New Phytol. 70(1): 173–186. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1971.tb02522.x
13. Faliňska K. 1981. Variability of *Caltha palustris* L. populations in garden culture. – Acta Soc Bot Pol. 50(3): 493–513. https://doi.org/10.5586/asbp.1981.072
14. *Brotherton S., Joyce C.B., Berg M.J., Awcock G.J.* 2019. Immediate and lag effects of hydrological change on floodplain grassland plants. – Plant ecol. 220(3): 345–359. https://doi.org/10.1007/s11258-019-00918-z
15. *Grootjans A.P., Fresco L.F.M., de Leeuw C.C., Schipper P.C.* 1996. Degeneration of species-rich *Calthion palustris* hay meadows; some considerations on the community concept. – J. Vegetation Sci. 7(2): 185–194. https://doi.org/10.2307/3236318
16. *Barykina R.P., Chubatova N.V.* 2000. [Marsh marigold]. – In: [Biological flora of the Moscow region. Issue 14]. Moscow. P. 87–100. (In Russian)
17. *Satsyperova I.F.* 1993. [Main aspects and methods of studying the reproductive biology of herbaceous plants during their introduction]. – In: [Problems of reproductive biology of seed plants. Saint-Peterburg]. P. 25–35. (In Russian)
18. *Zaitsev G.N.* 1973. [Methods of biometric calculations. Mathematical statistics in experimental botany]. Moscow. 256 p. (In Russian)
19. *Voronina L.V., Gritsenko A.G.* 2011. [Climate and ecology of the Novosibirsk region]. Novosibirsk. 228 p. (In Russian)
20. [*Adaptation* and variability of woody plants in the forest zone of Eurasia]. 1993. Ekaterinburg: 137 p. (In Russian)
21. *Shamrov I.I.* 2020. Factors reducing seed productivity in flowering plants. – Rastitelnye Resursy. 56(1): 4–15. https://doi.org/10.31857/s0033994620010057

**EDN:** KRHSBX
*РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, 2022, том 58, вып. 2, с. 144–151*

## ИНТРОДУКЦИЯ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ

# РОСТ И РАЗВИТИЕ *VACCINIUM ANGUSTIFOLIUM* (ERICACEAE) ПРИ ИНТРОДУКЦИИ В УСЛОВИЯХ УДМУРТИИ

**© 2022 г. Д. А. Зорин[1, *], А. В. Федоров[1]**
[1]*Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск, Россия*
**e-mail: zor-d@udman.ru*

Поступила в редакцию 26.01.2022 г.
После доработки 21.02.2022 г.
Принята к публикации 03.03.2022 г.

Работа посвящена комплексному изучению нового для территории Удмуртской Республики растения – *Vaccinium angustifolium* Ait. Голубика узколистная является перспективным ягодным кустарничком для культивирования в Средней полосе России. Растение характеризуется высокой зимостойкостью и способностью выдерживать понижение температуры до –40 °С, способно произрастать на бедных, кислых, переувлажненных почвах. Целью работы стало выявление биологических особенностей и параметров продуктивности *V. angustifolium* при интродукции в условиях Удмуртской Республики. Исследования проводились с использованием общепринятых методик. Изучались фенологические особенности, рост и развитие растений, продуктивность, морозостойкость и зимостойкость, дана интегральная оценка жизнесопособности и перспективности интродукции. Морфометрические характеристики растений в 2020 г.: высота растений – 40.6 ± 3.2 см, диаметр кроны – 59.4 ± 3.3 см, средняя продуктивность – 854.7 ± 60.1 г, средняя масса ягоды – 0.97 ± 0.10 г. В условиях Удмуртии голубика показала стабильный рост с минимальными повреждениями однолетних побегов и плодовых почек в зимний период. При продолжительных низких отрицательных температурах в декабре при отсутствии снежного покрова наибольшая степень подмерзания у отдельных растений составила 2 балла (слабое подмерзание). По многолетней оценке зимостойкости в полевых условиях Удмуртии голубику узколистную можно отнести к группе зимостойких. Использование интегральной шкалы показало перспективность интродукции голубики узколистной (группа перспективности II – перспективные).

*Ключевые слова:* интродукция, *Vaccinium angustifolium*, рост, развитие, фенология, зимостойкость
**DOI:** 10.31857/S0033994622020108

Голубика узколистная (*Vaccinium angustifolium* Ait.) листопадный кустарничек высотой от 20 до 50 см (относится к группе низкорослых голубик) из семейства вересковых (*Ericaceae* Juss.) [1, 2]. Естественный ареал занимает северо-восток США – штаты Мэн, Орегон и восток Канады – провинции Британская Колумбия, Квебек и Онтарио. Растения произрастают на открытых окраинах болот, заболоченных возвышенностях и песчаных пустошах. Данный вид введен в культуру в США и Канаде более 100 лет назад. Промышленные плантации в Европе имеются в Швеции, Норвегии, Финляндии, Эстонии, Беларуси.

Растения голубики узколистной характеризуются высокой зимостойкостью и способны выдержать понижение температуры до –34 ...–40 °С [3, 4]. Опасность для растений во время цветения представляют поздние весенние заморозки. Воздействие на растение температуры –3.5 °С в течение четырех часов приводит к повреждению 80% распустившихся цветков и 60% бутонов [5]. Вид способен произрастать на бедных, кислых переувлажненных почвах [6]. Ягоды содержат биологически активные вещества и являются ценным пищевым и лекарственным ресурсом. Создание плантаций голубики на выбывших из промышленной эксплуатации торфяных месторождениях, является эффективным способом фиторекультивации, который ослабляет ветровую эрозию [7]. Эти особенности делают данный вид привлекательным для возделывания в Среднем Предуралье.

Цель работы: выявление биологических особенностей и параметров продуктивности *V. angustifolium* при интродукции в условиях Удмуртской Республики.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в Удмуртской Республике, находящейся на востоке Русской равнины в междуречье Вятки и Камы. Данная террито-

рия в орографическом отношении является частью Среднего Предуралья. Климат республики умеренно-континентальный с продолжительной холодной многоснежной зимой и коротким теплым летом. Опыт закладывался в центральном агроклиматическом районе Республики (Селтинский район, с. Халды, 57°12′27″ с.ш. 51°54′56″ в.д.). Сумма температур выше 10 °С на этой территории составляет 1850 °С, продолжительность периода с температурой выше 10 °С колеблется от 115 до 123 дней. Гидротермический коэффициент за вегетационный период равен 1.2–1.3 [8].

Культивирование голубики узколистной в условиях Удмуртии было начато в 2014 г. [9–11]. Семена предоставлены сотрудниками Центрально-европейской лесной опытной станции Г.В. Тяк и Г.Ю. Макеевой в феврале 2014 г.

Семена в марте высеяны в посевные ящики на кислый верховой торф без заделки. Начало прорастания семян отмечено на 10 день. После появления первого настоящего листа сеянцы распикированы в стаканчики объемом 0.2 л, где они выращивались до весны 2015 г. Зимовка проходила в траншее с укрытием полиэтиленовой пленкой и нетканым материалом. Сохранность 95%.

Весной сеянцы голубики были высажены на постоянное место. Посадка проводилась на гряды, в качестве грунта использовалась смесь торфа, песка и хвойных опилок в соотношении 2 : 1 : 1 с внесением комплексных минеральных удобрений. Мульчирование посадок проводилось хвойными опилками. Схема посадки 50 × 60 см.

Фенологические наблюдения, изучение особенностей зимостойкости, продуктивности, товарно-потребительских качеств ягод образцов голубики проводили в соответствии с “Программой и методикой сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур” [12]. Морфометрические показатели вегетативной сферы кустов голубики определяли в конце вегетационных периодов 2015–2020 гг.

Оценку перспективности интродукции проводили по общепринятой методике разработанной ГБС РАН [13]. Учитываемые показатели и их оценка в баллах представлены в табл. 1, 2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам наблюдений в 2016–2020 гг. установлено, что в условиях Удмуртии сроки наступления основных фенофаз образцов голубики узколистной варьируют в следующих пределах:

– начало наступления вегетации (набухание почек) – третья декада апреля;

– распускание вегетативных и генеративных почек – первая–вторая декада мая;

– начало цветения – вторая декада мая–середина июня;

– начало созревания ягод – первая декада июня;

– массовое созревание ягод – вторая декада июля–первая декада августа;

– полное изменение сезонной окраски листьев – вторая декада сентября;

– начало опадения листьев – первая декада октября.

Главным лимитирующим фактором, определяющим успешность культивирования голубики узколистной в Среднем Предуралье, является зимостойкость, которая связана как с генетическими особенностями растений, так и с метеорологическими условиями, сложившимися в зимний период. Повреждаемость голубики обусловлена в основном негативным воздействием отрицательных температур, особенно при отсутствии или минимальном снежном покрове в декабре.

Наблюдения показали, что в отдельные годы при продолжительных низких отрицательных температурах в декабре (табл. 3) при отсутствии снежного покрова наибольшая степень подмерзания у отдельных растений составила 2 балла (слабое подмерзание). В такие годы итоги перезимовки, отраженные общим состоянием растений в конце вегетационного периода, оцениваются в 4 балла (отмерли концы приростов прошлого года, часть плодовых почек, урожай снижен [12]).

По результатам оценки зимостойкости в полевых условиях Удмуртии голубику узколистную можно отнести к группе зимостойких (растения, имеющие степень повреждения до 2 баллов в критические зимы и не повреждающиеся в обычные, не снижающие урожайности после перезимовки в критических условиях [12]).

Оценка жизнеспособности и перспективности интродукции голубики узколистной в условиях Удмуртии по данным визуальных наблюдений проведена по общепринятой методике [13] на основании морфологических критериев (табл. 4).

Использование интегральной шкалы показало перспективность интродукции голубики узколистной (группа перспективности II – перспективные) на территории Удмуртской Республики и сопредельных территорий со схожими климатическими условиями.

Морфометрические показатели надземной вегетативной части кустов измеряли ежегодно в первой декаде октября, продуктивность и параметры ягод в июле в момент плодоношения (табл. 5).

Проведенные осенью 2015 г. измерения показали, что растения характеризовались следующими морфометрическими показателями: высота 13.8 ± 1.1 см, количество побегов 8.6 ± 1.2 шт./куст, средняя длина побега 15.3 ± 1.4 см, размер листьев 29.2 × 11.3 мм.

**Таблица 1.** Оценка жизнеспособности и перспективности интродуцируемых растений *Vaccinium angustifolium* по данным визуальных наблюдений
**Table 1.** Visual assessment of the viability and prospects of introduced *Vaccinium angustifolium* plants

| № п/п | Показатель<br>Indicator | Характеристика показателей<br>Characteristics of indicators | Баллы<br>Points |
|---|---|---|---|
| 1 | Одревеснение побегов, % длины<br>Lignification of shoots, % of length | 100 | 20 |
| | | 75 | 15 |
| | | 50 | 10 |
| | | 25 | 5 |
| | | Не одревесневают<br>Do not lignify | 1 |
| 2 | Зимостойкость<br>Winter hardiness | I) Растение не обмерзает<br>I) Plants do not freeze | 25 |
| | | II) Обмерзает не более 50% длины однолетних побегов<br>II) 50% or less of the annual shoot's length freezes | 20 |
| | | III) Обмерзает от 50 до 100% длины однолетних побегов<br>III) 50 to 100% of the annual shoot's length freezes | 15 |
| | | IV) Обмерзают более старые побеги<br>IV) Older shoots freeze | 10 |
| | | V) Растение обмерзает до уровня снега<br>V) Exposed plant parts freeze down to the snow level | 5 |
| | | VI) Растение обмерзает до корневой шейки<br>VI) Entire above-ground part of the plant freezes | 3 |
| | | VII) Растение вымерзает целиком<br>VII) Entire plant freezes out | 1 |
| 3 | Сохранение формы роста (габитуса)<br>Retention of growth habit | Сохраняется<br>Persists | 10 |
| | | Восстанавливается<br>Restored | 5 |
| | | Не восстанавливается<br>Not restored | 1 |
| 4 | Побегообразовательная способность<br>Ability to form new shoots | Высокая – 6 и более побегов на 1 двухлетний побег<br>High – 6 or more shoots per 1 two-year shoot | 5 |
| | | Средняя – побегов достаточно для сохранения типичной жизненной формы и габитуса – 3–5 побегов<br>Medium – enough shoots to maintain the typical life form and habit – 3–5 shoots | 3 |
| | | Низкая – новые побеги единичны, утрата типичной жизненной формы и габитуса<br>Low – new shoots are sporadic, loss of typical life form and habit | 1 |
| 5 | Прирост в высоту<br>Height increment | Ежегодный<br>Annual | 5 |
| | | Не ежегодный<br>Irregular | 2 |

**Таблица 1.** Окончание

| № п/п | Показатель<br>Indicator | Характеристика показателей<br>Characteristics of indicators | Баллы<br>Points |
|---|---|---|---|
| 6 | Способность к генеративному размножению<br>Ability for seed reproduction | Семена созревают<br>Seeds | 25 |
| | | Семена не созревают<br>Seeds do not ripen | 20 |
| | | Цветет, не плодоносит<br>Plants blooms, but do not fruit | 15 |
| | | Не цветет<br>Plants do not bloom | 1 |
| 7 | Способы размножения в культуре<br>Methods of propagation under cultiavtion | Самосев<br>Self seeding | 10 |
| | | Искусственный посев<br>Artificial seeding | 7 |
| | | Естественное вегетативное размножение<br>Natural vegetative reproduction | 5 |
| | | Искусственное вегетативное размножение<br>Artificial vegetative propagation | 3 |
| | | Привлечение семян или растений из других районов<br>Utilization of seeds or plants from other areas | 1 |

**Таблица 2.** Шкала оценки перспективности интродукции растений *Vaccinium angustifolium*
**Table 2.** Scale for assessing the introduction potential of *Vaccinium angustifolium*

| Индекс<br>Class | Значение индекса<br>Class description | Соответствующая сумма баллов<br>Total score |
|---|---|---|
| I | Вполне перспективные<br>Completely promising | 91–100 |
| II | Перспективные<br>Promising | 76–90 |
| III | Менее перспективные<br>Less promising | 61–75 |
| IV | Малоперспективные<br>Of little promise | 41–60 |
| V | Неперспективные<br>Unpromising | 21–40 |
| VI | Абсолютно непригодные<br>Absolutely inadaptable | 5–15 |

**Таблица 3.** Метеорологические условия в холодный период (2015–2020 гг.)[1]
**Table 3.** Meteorological conditions of the cold season (2015–2020)[1]

| Период<br>Period | Температура, °C<br>Temperature, °C | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ноябрь<br>november | декабрь<br>december | январь<br>january | февраль<br>february | март<br>march |
| 2015/2016 | –3.8/–13.1* | –5.1/–22.8 | –13.1/–26.7 | –3.3/–12.5 | –2.6/–16.4 |
| 2016/2017 | –8.5/–23.9 | –13.9/–32.6 | –13.8/–35.7 | –9.3/–23.5 | –2.2/–15.7 |
| 2017/2018 | –1.0/–5.7 | –6.5/–24.2 | –10.1/–24.9 | –11.8/–28.5 | –8.8/–23.2 |
| 2018/2019 | –4.1/–17.9 | –9.5/–21.7 | –11.2/–25.8 | –8.8/–25.6 | –1.8/–17.5 |
| 2019/2020 | –4.2/–21.6 | –5.8/–24.5 | –4.8/–25.1 | –4.5/–21.2 | 1.0/–11.6 |

Примечание: [1] по данным метеостанции в с. Селты (Удмуртия, Россия): широта 57.30 долгота 52.15, высота над уровнем моря 184 м.
* В числителе – среднемесячная температура, в знаменателе – минимальная температура в месяце.
Note: [1] According to the weather station in the village Selty (Udmurtia, Russia): latitude 57.30 longitude 52.15, elevation above msl 184 m.
* In the numerator – the average monthly temperature, in the denominator – the minimum temperature of the month.

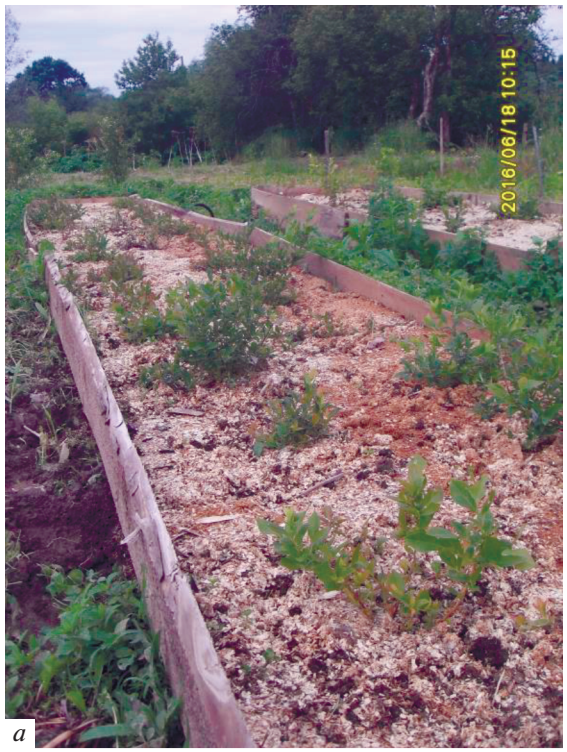
**Таблица 4.** Интегральная оценка интродукционной перспективности *Vaccinium angustifolium*
**Table 4.** Integral assessment of *Vaccinium angustifolium* introduction prospects of

| Показатели в баллах<br>Indicators in points | | | | | | | ОО<br>GA | ГП<br>CIP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ОП<br>LS | З<br>WH | СФР<br>RGH | ПС<br>SFA | ПВ<br>HI | СГР<br>ASR | СРК<br>MPC | | |
| 15 | 20 | 10 | 3 | 5 | 25 | 7 | 85 | II |

Примечание: ОП – одревеснение побегов, З – зимостойкость, СФР – сохранение формы роста, ПС – побегообразовательная способность, ПВ – прирост в высоту, СГР – способность к генеративному размножению, СРК – способы размножения в культуре, ОО – общая оценка, ГП – группа перспективности.
Note: LS – lignification of shoots, WH – winter hardiness, RGH – retention of the growth habit, SFA – shoot forming ability, HI – height increment, ASR – ability for seed reproduction, MPC – methods of propagation under cultivation, GA – general assessment, CIP – class of introduction potential.

**Таблица 5.** Морфометрические показатели растений *Vaccinium angustifolium*
**Table 5.** Morphometric parameters of *Vaccinium angustifolium* plants

| Год<br>Year | Размер куста, см<br>Bush size, cm | | Размер листьев, мм<br>Leaf size, mm | | Масса ягоды, г<br>Berry mass, g | Продуктивность, г/раст.<br>Productivity, g/plant |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | высота<br>height | диаметр<br>diameter | длина<br>length | ширина<br>width | | |
| 2015 | 13.8 ± 1 | 19.5 ± 1 | 29.2 ± 0.9 | 11.3 ± 0.4 | – | – |
| 2016 | 16.3 ± 1 | 27.1 ± 1 | 35.1 ± 1 | 14.8 ± 0.5 | – | – |
| 2017 | 24.8 ± 2 | 39.1 ± 2 | 37.2 ± 1 | 15.4 ± 0.5 | 1.10 ± 0.08 | – |
| 2018 | 31.6 ± 1 | 55.6 ± 3 | 43.3 ± 1.5 | 18.5 ± 0.8 | 0.70 ± 0.05 | 248 ± 23 |
| 2019 | 37.2 ± 3 | 58.3 ± 3 | 43.8 ± 1.4 | 18.8 ± 0.8 | 0.92 ± 0.08 | 456 ± 69 |
| 2020 | 40.6 ± 3 | 59.4 ± 3 | 42.7 ± 1.4 | 18.4 ± 0.7 | 0.97 ± 0.10 | 855 ± 60 |




*a*

*b*

**Рис. 1.** Внешний вид *Vaccinium angustifolium*. (*a*) – 2016 г., (*b*) – 2018 г.
**Fig. 1.** Appearance of *Vaccinium angustifolium*. (*a*) – 2016, (*b*) – 2018.

**Рис. 2.** Плодоношение *Vaccinium angustifolium*.
**Fig. 2**. Fruiting of *Vaccinium angustifolium*.

В последующие годы наблюдалось активное увеличение высоты и диаметра растений (рис. 1). В 2019 г. рост в высоту практически прекратился, отмечено увеличение диаметра кроны кустов. В 2020 г. средняя высота растений составила 40.6 см, диаметр кроны – 59.4 см.

В 2016 г. на отдельных растениях отмечено единичное плодоношение. В 2017 г. в фазу плодоношения вступили около 70% растений, средняя масса ягоды составила 1.10 г. В последующие годы (2018–2020) средняя масса ягоды составляла 0.70 – 0.97 г. Средняя продуктивность растений росла: в 2018 – 248.1 ± 22.8 г/раст., в 2020 – 854.7 ± 60.1 г/раст. (рис. 2).

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали возможность введения в культуру на территории Удмуртской Республики нового вида – *Vaccinium angustifolium* Ait. Культивируемые растения показали стабильный рост и высокую зимостойкость. Отмечено вхождение в генеративную фазу части растений на 2 год выращивания. На шестой год

выращивания средняя продуктивность растений составила 854.7 ± 60.1 г/раст. Необходимо проведение полевых исследований на территории выбывших из использования торфяных месторождений, с последующим отбором наиболее устойчивых и урожайных форм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Barker W.G.* 1964. The lowbush blueberry industry in eastern Canada. – Econ. Bot. 18(4): 357–365. https://doi.org/10.1007/BF02862721
2. *Морозов О.В., Гордей Д.В., Сауткин Ф.В., Буга В.А., Ярмолович С.В.* 2016. Культивирование голубики узколистной (*Vaccinium angustifolium* Ait.) в Белорусском Поозерье. Минск. 195 с.
3. *Trevett M.* 1969. Winter injury and fertilizers in lowbush blueberries. – Res. in Life Sci. 16(4): 4–15.
4. *Cappiello P.E., Dunham S.W.* 1994. Seasonal variation in low-temperature tolerance of *Vaccinium angustifolium* Ait. – Hort. Sci. № 29(4). P. 302–304. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.29.4.302
5. *Hicklenton P.R.* 2002. Freeze damage and frost tolerance thresholds for flowers of the lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.). – Acta Hort. № 574. P. 193–201. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.574.29
6. *Тяк Г.В., Тяк А.В.* 2013. Выращивание сеянцев голубики узколистой на выработанном торфянике. – В сб.: Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования: материалы X Международного симпозиума. Т. 1. Пущино, 17–21 июня 2013 г. М. С. 37–40. https://vniissok.ru/wp-content/uploads/2020/03/tom_1.pdf
7. *Грибок Н.А., Букляревич А.Г., Веевник А.А., Яковлев А.П.* 2014. Перспективы тиражирования посадочного материала голубики узколистной. – В сб.: Опыт и перспективы возделывания голубики на территории Беларуси и сопредельных стран: материалы международной научной конференции, 17–18 июля 2014 г., Минск. С. 35–39. http://hbc.bas-net.by/hbcinfo/books/Kurlovich2014-1.pdf
8. *Удмуртская Республика*: Энциклопедия. 2000. Ижевск. 799 с.
9. *Зорин Д.А.* 2017. Интродукция голубики узколистной в Удмуртии. – В сб.: Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования: Материалы XII международного симпозиума. М. С. 15–17. https://vniissok.ru/wp-content/uploads/2020/03/tom_1.pdf
10. *Зорин Д.А.* 2017. Опыт интродукции *Vaccinium angustifolium* Ait. в Удмуртии. – В сб.: Современные проблемы интродукции и сохранения биоразнообразия растений: материалы 3-ей заочной научно-практической конференции с международным участием. Воронеж. С. 31–34.
11. *Зорин Д.А.* 2019. Интродукция голубики узколистной в Среднем Предуралье. – В сб.: Аграрная наука – сельскохозяйственному производству: материалы Международной научно-практической конференции 12–15 февраля 2019 г., г. Ижевск. Ижевск. Т. 1. С. 142–144. https://izhgsha.ru/images/DOCS/Nauka/Konferenc/12-15feb2019/12-15feb2019_Tom1.pdf
12. *Программа* и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. 1999. Орел. С. 481–492.
13. *Лапин П.И., Сиднева С.В.* 1973. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений. – Опыт интродукции древесных растений. М. С. 7–67.


# Growth and Development of *Vaccinium angustifolium* (Ericaceae) under Introduction in Udmurtia


**D. A. Zorin[a], *, A. V. Fedorov[a]**

[a] *Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia*

**e-mail: zor-d@udman.ru*



**Abstract**—The work is devoted to the comprehensive study of a new plant for the territory of the Udmurt Republic – *Vaccinium angustifolium* Ait. The lowbush blueberry is a promising species for cultivation in Central Russia. It is characterized by high winter hardiness and the ability to withstand temperature drops down to –40 °C. It can grow on poor, acidic, waterlogged soils. The goal of the study was to identify the biological characteristics and productivity parameters of *V. angustifolium* when introduced in the Udmurtian Republic. The studies were carried out using widely accepted methods. Phenological features, plant growth and development, productivity, frost resistance and winter hardiness were studied; an integral assessment of the viability and prospects of introduction was given. Morphometric characteristics of plants in 2020 were the following: plant height – 40.6 ± 3.2 cm, crown diameter – 59.4 ± 3.3 cm, average productivity – 854.7 ± 60.1 g, average berry weight – 0.97 ± 0.10 g. In Udmurtia, lowbush blueberry showed stable growth with minimal damage to annual shoots and flower buds in winter. In the absence of snow cover, under the long spell of low

negative temperatures in December, the observed degree of freezing injury in individual plants was weak (2 points). According to the long-term assessment of winter hardiness of *V. angustifolium* in Udmurtia, the lowbush blueberry can be classified as winter hardy species. The blueberry introduction potential was assessed using integral scale, and was considered as promising (group II).

*Keywords:* introduction, *Vaccinium angustifolium* Ait., growth, development, phenology, winter hardiness

## REFERENCES

1. *Barker W.G.* 1964. The lowbush blueberry industry in eastern Canada. – Econ. Bot. 18(4): 357–365. https://doi.org/10.1007/BF02862721
2. *Morozov O.V., Gordej D.V., Sautkin F.V., Buga V.A., Jarmolovich S.V.* 2016. [Cultivation of lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.) in the Belarusian Poozerie.] Minsk. 195 p.
3. *Trevett M.* 1969. Winter injury and fertilizers in lowbush blueberries. – Res. Life Sci. 16(4): 4–15.
4. *Cappiello P.E., Dunham S.W.* 1994. Seasonal variation in low-temperature tolerance of *Vaccinium angustifolium* Ait. – Hort. Sci. 29(4): 302–304. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.29.4.302
5. *Hicklenton P.R.* 2002. Freeze damage and frost tolerance thresholds for flowers of the lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.). – Acta Hort. 574: 193–201. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.574.29
6. *Tjak G.V., Tjak A.V.* 2013. [Growing seedlings of *Vaccinium angustifolium* on a cutover peatland.] – In: [New and alternative plant species and their use prospects: Proceedings of the Xth International symposium. 17–21 June, 2003. Pushchino]. T. 1. Moscow. P. 37–40. https://vniissok.ru/wp-content/uploads/2020/03/tom_1.pdf (In Russian)
7. *Gribok N.A., Bukljarevich A.G., Veevnik A.A., Jakovlev A.P.* 2014. [Prospects for replicating planting material of *Vaccinium angustifolium*.] – In: [Experience and prospects of blueberry cultivation in Belorussia: Proceedings of international scientific conference. 17–18 June, 2013.]. Minsk. P. 35–39. http://hbc.bas-net.by/hbcinfo/books/Kurlovich2014-1.pdf
8. [*Udmurt* Republic: Encyclopedia.] 2000. Izhevsk. 799 p.
9. *Zorin D.A.* 2017. [Introduction of *Vaccinium angustifolium* in Udmurtia.] – In: [New and alternative plant species and their use prospects: Proceedings of the Xth International symposium. 17–21 June, 2003. Pushchino]. T. 1. Moscow. P. 15–17. https://vniissok.ru/wp-content/uploads/2020/03/tom_1.pdf
10. *Zorin D.A.* 2017. [Best practices of *Vaccinium angustifolium* Ait. introduction in Udmurtia]. – In: [Current issues of plant introduction and biodiversity protection: Proceedings of the 3rd virtual scientific and practical conference with international participation]. Voronezh. P. 31–34.
11. *Zorin D.A.* 2019. [Introduction of *Vaccinium angustifolium* in the Middle Urals.] – In: [Agricultural science for agricultural industry: proceedings of the International scientific and practical conference, 12-15 February, 2019, Izhevsk]. Izhevsk. T. 1. P. 142–144. https://izhgsha.ru/images/DOCS/Nauka/Konferenc/12-15feb2019/12-15feb2019_Tom1.pdf
12. [*Program* and methodology for the variety testing of fruit, berry and nut crops.] 1999. Orel. P. 481–492.
13. *Lapin P.I., Sidneva S.V.* 1973. [Evaluation of the prospects for the introduction of woody plants by their visual assessment]. – In: [Experience in tree species introduction]. Moscow. P. 7–67.

**EDN:** MTRIFH
*РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, 2022, том 58, вып. 2, с. 152–160*

## КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ

# КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ *ERODIUM STEPHANIANUM* (GERANIACEAE), ПРОИЗРАСТАЮЩИХ В РЕСПУБЛИКЕ БУРЯТИЯ

**© 2022 г. Л. П. Ильина[1], *, Д. Н. Оленников[2], Т. П. Анцупова[3]**

[1]*Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова, г. Улан-Удэ, Россия*

[2]*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия*

[3]*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия*

**e-mail: larisap11@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.07.2021 г.
После доработки 17.08.2021 г.
Принята к публикации 02.12.2021 г.

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований по изучению суммарного содержания дубильных веществ, макро- и микроэлементов, а также качественного фенольного состава надземных и подземных органов *Erodium stephanianum* Willd. Содержание дубильных веществ в растительном материале, собранном в фазу цветения, составляет 13 мас. % в корневой системе и 22 мас. % в надземной части. Для качественного определения индивидуальных фенольных соединений был применен метод ВЭЖХ, с помощью которого выявлено 14 соединений из водной вытяжки надземной части и 10 соединений из водной вытяжки подземной части *E. stephanianum*. Десять соединений встречаются как в надземной части растений, так и в корневой системе, четыре вещества – только в надземной части. В надземных и подземных органах выявлено 22 макро- и микроэлемента.

*Ключевые слова: Erodium stephanianum*, дубильные вещества, фенольные соединения, макроэлементы, микроэлементы

**DOI:** 10.31857/S0033994622010058

Территория Бурятии отличается разнообразием растительного покрова, в котором представлены лесные сообщества, кустарниковые заросли, степи и луга. Здесь произрастает более 2000 видов сосудистых растений, из них около 200 видов относятся к лекарственным, известным как в научной, так и в народной медицине [1, 2]. Представители семейства гераниевые Geraniaceae Juss. не являются фармакопейными видами, поэтому степень изученности их незначительна. Виды рода журавельник *Erodium* L'Her. относятся к лекарственным растениям, применяемым в народной медицине при внутренних кровотечениях, простудных заболеваниях, пневмонии, для лечения кожных сыпей; препараты из них оказывают гемостатическое действие, снижают сосудистую проницаемость, положительно влияют центральную нервную систему, кроме того, они используются в ветеринарии [3]. В республике встречаются два вида рода *Erodium*: журавельник цикутовый *E. cicutarium* (L.) L'Her. и журавельник Стефана *E. stephanianum* Willd. Для представителей семейства Geraniaceae характерно противогрибковое и противомикробное действие, что непосредственно связано с содержанием дубильных веществ (танидов, танинов) [4, 5]. В литературных источниках имеется информация о компонентном составе журавельника цикутового [3], но нам не встречались сообщения о компонентном составе журавельника Стефана. Работа с этим видом проводится нами с 2011 года [6, 7].

Целью данной работы явилось изучение суммарного содержания дубильных веществ, макро- и микроэлементов и качественного фенольного состава надземных и подземных органов *E. stephanianum*, произрастающего на территории Бурятии.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объект исследования – *Erodium stephanianum* Willd.[1] – двулетнее, реже многолетнее растение до

[1] Латинские названия семейства, рода и вида даны по С.К. Черепанову [9].

60 см высотой. Листья черешковые, дважды перистые, пластинки широкояйцевидные, 3–8 см длиной, 2.5–6.5 см шириной, с 2–3 парами низбегающих на стержень долей, которые в свою очередь более или менее глубоко рассечены на неравные ланцетные, цельные или зубчатые дольки. Зонтики из 2–4 цветков. Лепестки одинаковой длины, лиловато-синие. Встречается в песчаных и каменистых степях, на южных степных склонах, по высохшим руслам ручьев, по долинам рек, нередко как сорное растение вдоль дорог и на залежах. Произрастает повсеместно на территории Бурятии [2, 8].

Для определения суммарного содержания дубильных веществ и элементного состава брали высушенный, измельченный растительный материал *E. stephanianum*, для анализа фенольного состава использовали дубильные вещества, полученные путем водной экстракции из надземных и подземных органов вида. Растение было собрано в период цветения в окрестностях с. Кучегэр Курумканского района республики Бурятия. Растительная ассоциация – разнотравно-злаково-полынно-лапчатковая. Доминирующие виды: *Potentilla flagellaris* Willd. ex Schlecht., *Artemisia scoparia* Waldst. et Kit., *Agropyron cristatum* (L.) Beauv. Сопутствующие виды: *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Galium verum* L., *Sanguisorba officinalis* L., *Thermopsis lanceolata* R. Br. и др. Видовую принадлежность устанавливали по Определителю растений Бурятии [2].

Определение содержания танидов проводили по общепринятой методике методом перманганатометрического титрования [10, 11]. Оставшееся после титрования водное извлечение нагревали на водяной бане, в результате чего происходило испарение воды. Концентрированный раствор высушивали в сушильном шкафу при температуре 60 ± 2 °C до сухого состояния и оставляли для дальнейшего изучения.

Для определения фенольного состава растений брали 10 мг высушенного материала (дубильных веществ), растворяли в 1 мл 80%-ного раствора ацетонитрила, после чего центрифугировали (6000 *g*, 20 мин). Полученный раствор фильтровали через мембранный фильтр (0.45 мкм) и использовали для анализа (1 мкл). Анализ осуществляли на жидкостном хроматографе LCMS-8050 (Shimadzu, Columbia, MD, USA), соединенном с диодно-матричным детектором (ДМД) и 3Q детектором с ионизацией электрораспылением (ИЭР/МС; electrospray ionization, ESI), используя колонку GLC Mastro C18 (150 × 2.1 мм, размер частиц сорбента 3 мкм; Shimadzu, Kyoto, Japan). Условия ВЭЖХ: подвижная фаза, элюент А – вода, элюент В – ацетонитрил; программа градиента – 0–10 мин 5–12% В, 10–20 мин 12–45% В, 20–40 мин 45–100% В; инжектируемый объем – 1 мкл; скорость потока – 200 мкл/мин, температура колонки – 30 °C; диапазон сканирования спектров поглощения – 200–600 нм. Условия ДМД: 270 нм. Условия ИЭР-МС: режим ионизации – электрораспыление; температура интерфейса ИЭР – 300 °C; температура линии десольватации – 250 °C; температура нагревательного блока – 400 °C; скорость газа-распылителя ($N_2$) – 3 л/мин; скорость газа-нагревателя (воздух) – 10 л/мин; давление газа, используемого для диссоциации, индуцируемой соударением (CID, газ, Ar) – 270 кПа; расход Ar – 0.3 мл/мин; напряжение на капилляре – 3 кВ; диапазон сканирования масс (*m/z*) 100–1900.

В работе использованы образцы веществ сравнения (каталожный номер, содержание основного вещества) следующих производителей: ChemFaces (Wuhan, Hubei, PRC) – дегидрогераниин (CFN90259, ≥ 98%), кверцетин-3-*O*-галлоилглюкозид (CFN91064, ≥ 98%), эродиол (CFN99851, ≥ 98%); MCE MedChemExpress (Monmouth, NJ, USA) – 5-*O*-галлоилхинная кислота (HY-122921, ≥ 98%); Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA) – галловая кислота (G7384, ≥ 98%), гераниин (PHL80994, ≥ 95%), корилагин (G0424, ≥ 98%), эллаговая кислота (E2250, ≥ 95%), кверцетин (Q4951, ≥ 95%), кверцетин-3-*O*-глюкозид (16654, ≥ 98%), кверцетин-3-*O*-галактозид (83388, ≥ 97%).

Элементный состав растительного сырья определяли недеструктивным методом рентгенофлуоресценции на волновом рентгеновском спектрометре S4 Pioneer (Bruker AXS, Germany) с рентгеновской трубкой мощностью 4 кВт и Rh-анодом. Из каждого образца брали 2 навески по 0.5 г растительного материала, прессованного в виде таблеток. Условия измерения: при определении элементов от Na до K напряжение на трубке составляет 30 кВ, сила тока 60 мА; при определении элементов от Ca до Pb – 50 кВ и 40 мА соответственно. Время набора импульсов изменялось от 10 до 100 с в зависимости от содержания элемента [12].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Суммарное содержание дубильных веществ в растительном материале *E. stephanianum* составило 22 мас. % в надземной части и 13 мас. % в корневой системе. Высокое содержание дубильных веществ в видах семейства Geraniaceae, в частности в надземных и подземных органах *Geranium pratense* L., *G. sylvaticum* L., *G. palustre* L., произрас-

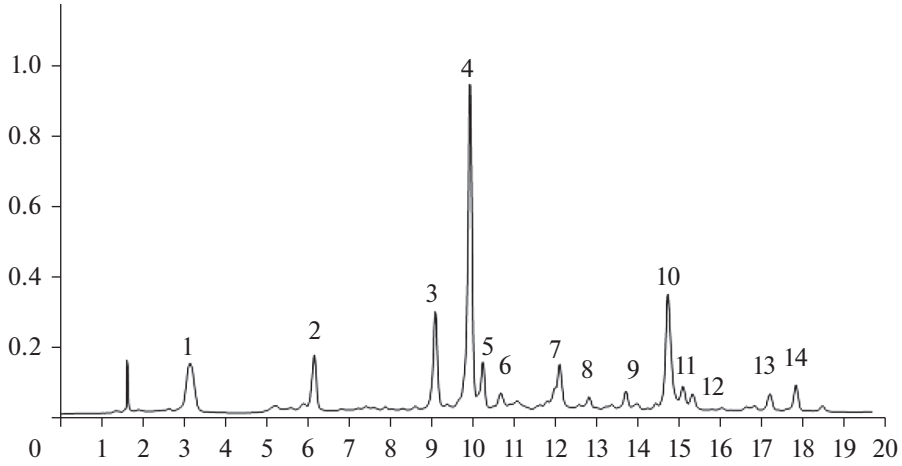



**Рис. 1.** Хроматограмма (ВЭЖХ) водного извлечения из надземной части растений *Erodium stephanianum*.
*По горизонтали* – время удерживания, мин; *по вертикали* – оптическая плотность при 270 нм.
Соединения: **1** – галловая кислота, **2** – 5-*O*-галлоилхинная кислота, **3** – дегидрогераниин, **4** – гераниин, **5** – корилагин, **6** – эродиол, **7** – три-галлоилглюкоза (изомер), **8** – три-галлоилглюкоза (изомер), **9** – три-галлоилглюкоза (изомер), **10** – эллаговая кислота, **11** –кверцетин-3-*O*-глюкозид, **12** – кверцетин-3-*O*-галактозид, **13** – кверцетин-3-*O*-галлоилглюкозид, **14** – кверцетин.
**Fig. 1.** Chromatogram (HPLC) of an aqueous extract from the above ground parts of *Erodium stephanianum*.
*X-axis* – retention time, min; *y-axis* – optical density at 270 nm.
Compounds: **1** – gallic acid, **2** – 5-*O*-galloylquinic acid, **3** – dehydrogeraniin, **4** – geraniin, **5** – corylagin, **6** – erodiol, **7** – tri-galloylglucose (isomer), **8** – tri-galloylglucose (isomer), **9** – tri-galloylglucose (isomer), **10** – ellagic acid, **11** – quercetin-3-*O*-glucoside, **12** – quercetin-3-*O*-galactoside, **13** – quercetin-3-*O*-galloylglucoside, **14** – quercetin.

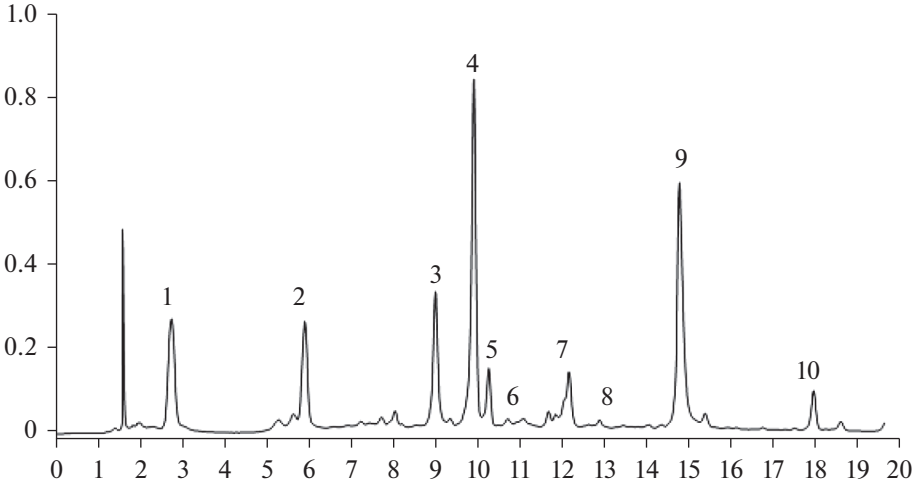



**Рис. 2.** Хроматограмма (ВЭЖХ) водного извлечения из корней растений *Erodium stephanianum*.
*По горизонтали* – время удерживания, мин; *по вертикали* – оптическая плотность при 270 нм.
Соединения: **1** – галловая кислота, **2** – 5-*O*-галлоилхинная кислота, **3** – дегидрогераниин, **4** – гераниин, **5** – корилагин, **6** – эродиол, **7** – три-галлоилглюкоза (изомер), **8** – три-галлоилглюкоза (изомер), **9** – эллаговая кислота, **10** – кверцетин.
**Fig. 2.** Chromatogram (HPLC) of the aqueous extract from roots of *Erodium stephanianum*.
*X-axis* – retention time, min; *y-axis* – optical density at 270 nm.
Compounds: **1** – gallic acid, **2** – 5-*O*-galloylquinic acid, **3** – dehydrogeraniin, **4** – geraniin, **5** – corylagin, **6** – erodiol, **7** – tri-galloylglucose (isomer), **8** – tri-galloylglucose (isomer), **9** – ellagic acid, **10** – quercetin.

**Таблица 1.** Идентификация и время удерживания соединений 1–14 из надземных органов *Erodium stephanianum*
Table 1. Identification and retention time of compounds 1–14 from the above-ground parts of *Erodium stephanianum*

| Идентификация<br>Identification | Соединения<br>Compounds | Время удерживания, мин<br>Retention time, min |
|---|---|---|
| Сравнение с известным веществом<br>Comparison with a known substance | **1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14** | 3.05; 6.18; 9.10; 10.04; 10.22; 10.67; 14.89; 15.04; 15.39; 17.20; 17.85 |
| По данным УФ- и масс-спектров*<br>By UV- and mass- spectra* | **7, 8, 9, 13** | 12.21; 12.92; 13.73; 17.20 |

Примечание. * УФ-спектры: λmax 277 (± 2), 300 плечо (± 4) нм. Масс-спектры: 635 [M-H]-, 483 [(M-H)-галлоил]-, 331 [(M-H)-2 × галлоил]-, 179 [(M-H)-3 × галлоил]-
Note. * UV: λmax 277 (± 2), shoulder 300 (± 4) nm. Mass spectra: 635 [M-H]-, 483 [(M-H)-galloyl]-, 331 [(M-H)-2 × galloyl]-, 179 [(M-H)-3 × galloyl]-.

**Таблица 2.** Идентификация и время удерживания соединений 1–10 из подземных органов *Erodium stephanianum*
Table 2. Identification and retention time of compounds 1–10 from underground parts of *Erodium stephanianum*

| Идентификация<br>Identification | Соединения<br>Compounds | Время удерживания, мин<br>Retention time, min |
|---|---|---|
| Сравнение с известным веществом<br>Comparison with a known substance | **1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10** | 3.05; 6.18; 9.10; 10.04; 10.22; 10.67; 14.89; 17.85 |
| По данным УФ- и масс-спектров*<br>By to UV- and mass- spectra* | **7, 8** | 12.21; 12.92 |

Примечание. * УФ-спектры: λmax 277 (± 2), 300 плечо (± 4) нм. Масс-спектры: 635 [M-H]-, 483 [(M-H)-галлоил]-, 331 [(M-H)-2 × галлоил]-, 179 [(M-H)-3 × галлоил]-
Note. * UV: λmax 277 (± 2), 300 shoulder (± 4) nm. Mass spectra: 635 [M-H]-, 483 [(M-H)-galloyl]-, 331 [(M-H)-2 × galloyl]-, 179 [(M-H)-3 × galloyl]-

тающих на Северо-Западе России, подтверждают литературные данные [3–5, 13, 14].

С помощью метода ВЭЖХ было выявлено 14 фенольных соединений из водной вытяжки надземной части (рис. 1) и 10 соединений из водной вытяжки подземной части (рис. 2) журавельника Стефана. При анализе компонентного состава (по результатам, представленным на рис. 1 и 2) установлено, что число фенольных соединений в надземных органах растения больше, чем в подземных. Суммарное содержание дубильных веществ также является более высоким в надземной части по сравнению с подземной частью. Десять соединений (галловая, 5-*O*-галлоилхинная, эллаговая кислоты, дегидрогераниин, гераниин, корилагин, эродиол, кверцетин, два изомера три-галлоилглюкозы со временем удерживания 12.21 и 12.92 мин соответственно) встречаются как в надземной части растения, так и в корневой системе. Только в надземной части обнаружены четыре вещества: кверцетин-3-*O*-глюкозид, кверцетин-3-*O*-галактозид, кверцетин-3-*O*-галлоилглюкозид и третий изомер три-галлоилглюкозы со временем удержания 13.73 минуты.

Выделение вторичных метаболитов проводили с помощью жидкостной хроматографии водной вытяжки из растительного сырья, используя следующие методы идентификации: 1) путем сравнения с известными веществами; 2) по наличию в дубильных веществах фенольного кольца и хромофоров (метод УФ-спектрофотометрии); 3) методом масс-спектрометрии (наиболее удобный и информативный). Полученные результаты представлены в табл. 1 и 2.

**Таблица 3.** Элементный состав *Erodium stephanianum*, мкг/г воздушно-сухого сырья
**Table 3.** Elemental composition of *Erodium stephanianum*, μ/g air-dry weight

| Элемент Element | Надземные органы Above-ground plant parts | Подземные органы Underground plant parts | Элемент Element | Надземные органы Above-ground plant parts | Подземные органы Underground plant parts |
|---|---|---|---|---|---|
| Na | 640 | 450 | Sr | 4.4 | <2 |
| Mg | 6200 | 7800 | Ba | 40 | 16 |
| P | 2050 | 1860 | Cr | 16.2 | 4.3 |
| S | 2080 | 1250 | Mn | 82 | 31 |
| Cl | 1230 | 1940 | Ni | 6.3 | 4.2 |
| K | 10 100 | 7500 | Cu | 7.9 | 7.4 |
| Ca | 24 400 | 8000 | Zn | 28 | 40 |
| Fe | 2010 | 240 | Br | 21 | 25 |
| Al | 3390 | 290 | Rb | 52 | 40 |
| Si | 9360 | 940 | Zr | 4.4 | <2 |
| Ti | 226 | 19 | Pb | 2 | <2 |

Данные табл. 1 и 2 показывают, что идентификацию фенольных соединений проводили преимущественно на основе сравнения с известными веществами: это соединения 1–6, 10, 11, 12, 14, выделенные из надземных органов и соединения 1–6, 9, 10, выделенные из подземных органов журавельника Стефана (расшифровка соединений приведена в подписях к рис. 1 и 2). Идентификацию некоторых соединений подтверждали с помощью УФ- и масс-спектрометрии: это соединения 7–9, 13 из вытяжки надземной части и соединения 7, 8 из вытяжки подземной части растения.

Анализ литературных данных о фенольном составе видов семейства Geraniaceae, произрастающих в других регионах, показал, что в траве *Geranium sibiricum* L. из Курской области также содержатся галловая кислота [15]; в траве того же вида из Узбекистана – галовая и эллаговая кислоты, гераниин и кверцетин [13]. В надземной и подземной части *Geranium pratense*, *G. sylvaticum*, *G. palustre*, произрастающих на Северо-Западе Европейской России содержатся галловая и эллаговая кислоты [16]. Другие соединения, обнаруженные у *E. stephanianum*, не встречаются у перечисленных видов, что вероятно указывает на видовую и территориальную специфику.

Состав и содержание элементов в растительном материале *E. stephanianum* представлены в табл. 3. Из определявшихся 22 элементов 8 относятся к макроэлементам (Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Fe), остальные 14 – к микроэлементам (Al, Si, Ti, Sr, Ba, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Br, Rb, Zr, Pb). Из макроэлементов наиболее высокое содержание отмечено для K (10 100 мкг/г в надземной части и 7500 мкг/г в подземной) и Ca (24 400 и 8000 мкг/г соответственно), которые относятся к биофилам [17, 18]. Наиболее низким содержанием отличается Na (640 мкг/г в надземных и 450 мкг/г

**Таблица 4.** Коэффициент корневого барьера (ККБ) вида *Erodium stephanianum* в порядке возрастания
**Table 4.** Translocation factor (TF) of the *Erodium stephanianum* species in ascending order

| Элемент Element | ККБ RBI | Элементы Elements | ККБ RBI |
|---|---|---|---|
| Ti | 0.08 | Ni | 0.67 |
| Al | 0.09 | Na | 0.70 |
| Si | 0.10 | K | 0.74 |
| Fe | 0.12 | Rb | 0.77 |
| Cr | 0.27 | P | 0.91 |
| Ca | 0.33 | Cu | 0.94 |
| Mn | 0.38 | Pb | ≥ 0.95 |
| Ba | 0.40 | Br | 1.19 |
| Zr | 0.43 | Mg | 1.26 |
| Sr | 0.43 | Zn | 1.43 |
| S | 0.60 | Cl | 1.58 |

в подземных органах). Информация о низком содержании натрия в *Hypericum perforatum* представлена в работе Т.И. Сиромля и Ю.В. Загурской [19].

Из микроэлементов относительно высокое содержание в образцах журавельника Стефана отмечено для Si (9360 мкг/г в надземной части и 940 мкг/г в подземной части) и Al (3390 и 290 мкг/г соответственно), значительно меньшее – для Ti и Mn (соответственно 226 и 82 мкг/г в надземной части; 19 и 31мкг/г в корнях) и наиболее низкое – для Sr, Zr и Pb (соответственно 4.4, 4.4 и 2 мкг/г в надземных органах и менее 2 мкг/г в подземных органах). Низкое содержание стронция, циркония и свинца в корневой системе, вероятно, свидетельствует об экологически чистом местопроизрастании вида. В литературе имеется информация о содержании 3 макро- и 5 микроэлементов в надземной и подземной частях *Geranium palustre*, *G. pratense* и *G. sylvaticum*, при этом отмечено значительное накопление Ca, Mg, Zn и Mn [20], что совпадает с нашими данными.

Данные табл. 3 свидетельствуют, что наблюдается заметное различие в накоплении элементов в подземных и надземных органах *E. stephanianum*, особенно четко это заметно при расчете коэффициента корневого барьера (ККБ), т.е. отношения содержания элементов в корневой системе к концентрации их в надземной части (табл. 4).

Как видно из табл. 4, для 18 элементов (Ti, Al, Si, Fe, Cr, Ca, Mn, Ba, Zr, Sr, S, Ni, Na, K, Rb, P, Cu, Pb) коэффициент корневого барьера ниже единицы, что указывает на безбарьерный переход элементов из подземных органов в надземные. Для остальных 4 элементов (Br, Mg, Zn, Cl) существует препятствие перехода (ККБ от 1.2 до 1.6), т.е. указанные элементы концентрируются в большей степени в надземной, чем в подземной части. Таким образом, информация о преимущественном содержании элементов в корнях растений, поскольку их основным источником их является почва [21], на примере *E. stephanianum* не подтверждается.

Компонентный состав и содержание макро- и микроэлементов в растительном материале исследуемого вида вероятнее всего зависит от ряда факторов: природы биологически активных веществ и элементов, видовой специфики, особенностей условий местообитания, химических и физических свойств почвы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано суммарное содержание дубильных веществ, макро- и микроэлементов, а также качественный фенольный состав надземных и подземных органов *Erodium stephanianum* Willd. на территории Республики Бурятия (Курумканский р-н). Установлено, что суммарное содержание дубильных веществ в надземных органах является более высоким, чем в подземных (22 и 13 мас. % соответственно).

Компонентный состав фенольного комплекса, установленный с помощью ВЭЖХ при сравнении с известными веществами, а также на основе УФ- и масс-спектрометрии, указывает на различие фенольного состава надземной части и корневой системы *E. stephanianum*. В надземной части растений *E. stephanianum* обнаружено и идентифицировано 14 фенольных соединений, в подземной части – 10 соединений.

Определено содержание 8 макро- и 14 микроэлементов в подземной и надземной частях

*E. stephanianum*. Более высокое содержание в надземной части растений по сравнению с подземной выявлено для 18 элементов (Ti, Al, Si, Fe, Cr, Ca, Mn, Ba, Zr, Sr, S, Ni, Na, K, Rb, P, Cu, Pb), что указывает на их безбарьерное передвижение. Остальные 4 элемента (Br, Mg, Zn, Cl) в большей степени концентрируются в корневой системе, чем в надземной части.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем искреннюю благодарность к.х.н. Е.В. Чупариной, научному сотруднику лаборатории Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск) за помощь в проведении элементного анализа растительного сырья.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анцупова Т.П., Дашиева Ж.Д., Ендонова Г.Б., Жапова О.И., Ильина Л.П., Павлова Е.П.* 2015. Лекарственные растения Бурятии в науке и практике. Улан-Удэ. 150 с.
2. *Определитель* растений Бурятии. 2001. Улан-Удэ. 672 с.
3. *Растительные* ресурсы СССР: Цветковые растения, их химический состав, использование. Семейства Rutaceae – Elaeagnaceae. 1988. Л. 357 с.
4. *Минаева В.Г.* 1991. Лекарственные растения Сибири. Новосибирск. 431 с.
5. *Телятьев В.В.* 1985. Полезные растения Центральной Сибири. Иркутск. 384 с.
6. *Ильина Л.П., Анцупова Т.П.* 2016. Дубильные вещества представителей семейства *Geraniaceae* Бурятии. – Междунар. науч.-иссл. журн. 5(47): 73–74. https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.083
7. *Ильина Л.П., Анцупова Т.П.* 2017. Содержание макро- и микроэлементов растений рода *Erodium* L'Her. – В сб.: Теоретические и практические вопросы интеграции химической науки, технологии и образования: Матер. II науч.-практ. конф. с межд. участием. Улан-Удэ. С. 58–62.
8. *Флора* Центральной Сибири. 1979. Т. 2. Новосибирск. 513 с.
9. *Черепанов С.К.* 1995. Сем. *Geraniaceae* Juss. – В кн.: Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб. С. 520–521.
10. *Государственная Фармакопея Российской Федерации*. Т. 1. М. 2015. 1469 с. https://docs.rucml.ru/feml/pharma/v13/vol1/
11. *Гринкевич Н.И., Сафронич Л.Н.* 1983. Химический анализ лекарственных растений. М. 176 с.
12. *Чупарина Е.В., Мартынов А.М.* 2011. Применение недеструктивного РФА для определения элементного состава лекарственных растений. – Журн. аналит. химии. 66(4): 399–405. https://elibrary.ru/item.asp?id=16311412
13. *Жамалова Д.Н., Пулатов С.О., Курбаниязова Г.Т., Жабборов А.М., Тажиева Ф.А.* 2019. Виды рода *Geranium* L. во флоре Узбекистана: распространение, химический состав и биологическая активность. – Universum: химия и биология: электрон. научн. журн. 10(64). http://7universum.com/ru/nature/archive/item/7865
14. *Разаренова К.Н., Жохова Е.В.* 2011. Сравнительная оценка содержания дубильных веществ в некоторых видах рода *Geranium* L. флоры Северо-Запада.– Химия растит. сырья. 4: 187–192. https://elibrary.ru/item.asp?id=17289491
15. *Бубенчиков Р.А., Позднякова Т.А.* 2014. Изучение состава фенольных соединений герани сибирской методом ВЭЖХ. – В сб.: Медико-социальная экология личности: состояние и перспективы: Матер. XII Междунар. конф. Минск. С. 13–15. https://elib.bsu.by/handle/123456789/94625
16. *Разаренова К.Н., Сипкина Н.Ю., Жохова Е.В.* 2012. Динамика накопления некоторых фенольных соединений в надземной и подземной частях *Geranium pratense* L. – Бутлеров. сообщ. 31(7): 93–97. https://butlerov.com/stat/reports/details.asp?lang=ru&id=10505
17. *Битюцкий Н.П.* 1999. Микроэлементы и растение. СПб. 232 с.
18. *Ловкова М.Я., Рабинович А.М., Пономарева С.М., Бузук Г.Н., Соколова С.М.* 1990. Почему растения лечат. М. 256 с.
19. *Сиромля Т.И., Загурская Ю.В.* 2019. Элементный химический состав *Hypericum perforatum* – ненормируемые элементы. – Химия растит. сырья. 2: 179–187. https://doi.org/10.14258/jcprm.2019023965
20. *Разаренова К.Н., Жохова Е.В., Беляева А.И.* 2013. Минеральный состав некоторых видов рода *Geranium* (Geraniaceae). – Растит. ресурсы. 49(1): 118–124. https://elibrary.ru/item.asp?id=18762307
21. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* 1989. Микроэлементы в почвах и растениях. Пер. с англ. М. 439 с.

# Component Composition of *Erodium stephanianum* (Geraniaceae) Found in the Republic of Buryatia

**L. P. Ilyina[a], *, D. N. Olennikov[b], T. P. Antsupova[c]**

[a] *Philippov Buryat State Academy of Agriculture, Ulan-Ude, Russia*

[b] *Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russia*

[c] *East-Sibirian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia*

**e-mail: larisap11@mail.ru*

**Abstract**—The underground and above-ground parts of *Erodium stephanianum* Willd. were tested for quantitative content of some tannins, macro- and micro-elements and qualitative phenolic structure. Tannins are a group of phenolic compounds. Tannin content in plants gathered during flowering was 13 wt % of roots and 22 wt % of the above-ground parts. Using high performance liquid chromatography (HPLC) 14 individual phenolic compounds were isolated form the aqueous extract of the above-ground parts and 10 – from the underground parts of the *E. stephanianum*. Both for shoot and root systems, 10 compounds were found to be common and 4 substances were isolated from the above-ground parts only. During the study, both in below- and above-ground plant parts 22 macro- and micro-elements were found. Variations in the component composition and quantity of the elements in *E. stephanianum* depend on different natural factors.

*Keywords: Erodium stephanianum*, tannins, phenolic compounds, macro- and micro-elements

## ACKNOWLEDGEMENTS

We gratefully acknowledge E.V. Chuparina, Dr. of Chemistry, the research scientist of the laboratory of the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk) for assistance in elemental analysis of herbal raw materials.

## REFERENCES

1. *Antsupova T.P., Dashieva Zh.D., Endonova G.B., Zhapova O.I., Ilina L.P., Pavlova E.P.* 2015. [Medicinal plants of Buryatia in science and practice]. Ulan-Ude. 150 p. (In Russian)
2. [*Guide* to plants of Buryatia].2001. Ulan-Ude. 672 p. (In Russian)
3. [*Plant* resources of the USSR: Flowering plants, their chemical composition and use. Family Rutaceae – Elaeagnaceae]. 1988. Leningrad. 357 p.(In Russian)
4. *Minaeva V.G.* 1991. [Medicinal plants of Siberia]. Novosibirsk. 431 p. (In Russian)
5. *Telyatev V.V.* 1985. [Useful plants of the Central Siberia]. Irkutsk. 384 p. (In Russian)
6. *Ilyina L.P., Antsupova T.P.* 2016. [Tannins in representatives family Geraniaceae of Buryatia]. – Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatelskij zhurnal. 5(47): 73–74. https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.083 (In Russian)
7. *Ilina L.P., Antsupova T.P.* 2017. [The content of macro- and micro-elements in plants of the genus *Erodium* L'Her.]. – In: [Theoretical and practical issues of the integration of chemical science, technology and education: Materials of the II scientific and practical conference with international participation]. Ulan-Ude. P. 58–62. (In Russian)
8. [*Flora* of the Central Siberia]. 1979. T. 2. Novosibirsk. 513 p. (In Russian)
9. *Cherepanov S.K.* 1995. Family *Geraniaceae* Juss. – In: [Vascular plants of Russia and neighboring countries ( the former USSR)]. St. Petersburg. P. 520–521. (In Russian)
10. *State* Pharmacopoeia of the Russian Federation. T. 1. Moscow. 2015. 1469 p. (In Russian) https://pharmacopoeia.ru/en/gosudarstvennaya-farmakopeya-xiii-online-gf-13-online/
11. *Grinkevich N.I., Safronich L.N.* 1983. [Chemical analysis of medicinal plants].Moscow. 176 p. (In Russian)
12. *Chuparina E.V., Martynov A.M.* 2011. Application of non-destructive X-ray fluorescence analysis to determine the element composition of medicinal plants. – J. Analytical Chemistry. 66(4): 389–395. (In Russian) https://doi.org/10.1134/S106193481104006X
13. *Zhamalova D.N., Pulatov S.O., Kurbaniyazova G.T., Zhabborov A.M., Tazhieva F.A.* 2019. Types of *Geraniaceae* family in flora of Uzbekistan: distribution, chemical composition and biological activity. – Universum: khimiya i biologiya: 10(64). http://7universum.com/ru/nature/archive/item/7865 (In Russian)

14. *Razaryonova K.N., Zhokhova E.V.* 2011. [Comparative assessment of the tannins content in some *Geranium* L. species from the Northwest of Russia].– Khimija rastitel'nogo syr'ja. 4: 187–192. (In Russian) https://elibrary.ru/item.asp?id=17289491
15. *Bubenchikov R.A., Pozdniakova T.A*. 2014. The study of composition phenolic compounds of *Viola arvensis* L. by means of HPLH. – In: Medical and social ecology of presonality: status and prospects: XII International conference materials. Minsk. P. 13–15. (In Russian) https://elib.bsu.by/handle/123456789/94625
16. *Razaryonova K.N., Sipkina N.Ju., Zhokhova E.V.* 2012. Phenological variations of some phenolic components in the aerial part and root part of *Geranium pratense* L. – Butlerov Communications. 31(7): 93–97. (In Russian) https://butlerov.com/files/reports/2012/vol31/7/93/93-97-11_12_201210.pdf
17. *Bitiutskii N.P.* 1999. [Microelements and plant]. St. Petersburg. 232 p. (In Russian)
18. *Lovkova M.Ya., Rabinovich A.M., Ponomareva S.M., Buzuk G.N., Sokolova S.M.* 1990. [Why the plants treat?]. Moscow. 256p. (In Russian)
19. *Siromlya T.I., Zagurskaya Yu.V.* 2019. Chemical element composition of *Hypericum perforatum* plants: elements which concntrations are not regulated.– Khimija rastitel'nogo syr'ja. 2: 179–187. https://doi.org/10.14258/jcprm.2019023965 (In Russian)
20. *Razarenova K.N., Zhohova E.V., Belyaeva A.I.* 2013. Element composition of some *Geranium* species (Geraniaceae). – Rastitelnye resursy. 49(1): 118–124. (In Russian) https://elibrary.ru/item.asp?id=18762307
21. *Kabata-Pendias A., Pendias H.* 1989. [Trace elements in soils and plants]. Transl. from Engl. Moscow. 439p. (In Russian)

**EDN:** JPSOPJ
*РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, 2022, том 58, вып. 2, с. 161–164*

## КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ

# ТРИТЕРПЕНОИДЫ СОЦВЕТИЙ *SYNURUS DELTOIDES* (ASTERACEAE) В ПРИМОРСКОМ КРАЕ

**© 2022 г. А. В. Мягчилов[1, 2, *]**

[1]*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия*

[2]*Тихоокеанский институт биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН, г. Владивосток, Россия*

**e-mail: dfdfdf47@yandex.ru*

Поступила в редакцию 16.08.2021 г.
После доработки 09.11.2021 г.
Принята к публикации 02.12.2021 г.

Одним из малоизученных видов растений, произрастающих на Российском Дальнем Востоке, является *Synurus deltoides* (Ait.) Nakai (Asteraceae), обладающий противовоспалительным, антиоксидантным, диуретическим, обезболивающим свойствами и используемый в народной медицине. В *S. deltoides* содержатся тритерпеноиды, имеющие широкий спектр фармакологического действия, поэтому этот вид можно рассматривать как перспективный источник биологически активных соединений. Методом экстракции (70%-ным этиловым спиртом) и препаративной колоночной хроматографии на силикагеле в режиме изократического элюирования впервые из надземной части (соцветия) *S. deltoides*, произрастающей в Приморском крае Дальнего Востока России, выделены 2 соединения класса тритерпеноидов: 3-*O*-ацетил-α-амирин, 3-*O*-ацетиллупеол. Структура выделенных соединений доказана методами ИК- и ЯМР-спектроскопии.

*Ключевые слова: Synurus deltoides* (Ait.) Nakai, тритерпеноиды, 3-*O*-ацетил-α-амирин, 3-*O*-ацетиллупеол

**DOI:** 10.31857/S0033994622010083

На Дальнем Востоке России произрастают лекарственные растения, которые издавна используются в народной медицине для лечения желудочно-кишечных, сердечно-сосудистых и других заболеваний [1, 2]. Возможности использования таких растений в официнальной медицине [3] ограничены в связи с недостаточной изученностью их компонентного состава.

Одним из таких малоизученных видов растений, произрастающих на Российском Дальнем Востоке, является *Synurus deltoides* (Ait.) Nakai (Asteraceae), обладающий противовоспалительным, антиоксидантным, диуретическим, обезболивающим свойствами [4–6] и используемый в народной медицине как противозолотушное средство [1]. В *S. deltoides* содержатся тритерпеноиды, флавоноиды [7–10], отличающиеся широким спектром фармакологического действия, поэтому этот вид можно рассматривать как перспективный источник биологически активных соединений.

Целью работы являлось исследование состава тритерпеноидов в надземной части (соцветия) *Synurus deltoides*.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для выделения тритерпеноидов использовали надземную часть (соцветия) *Synurus deltoides*, собранную в Приморском крае (пос. Тавричанка, Надеждинский р-н, сентябрь 2020 г.) в фенофазу цветения. Сушка сырья проводилась при комнатной температуре. Высушенную надземную часть (соцветия) *S. deltoides* измельчали до размеров частиц 1–2 мм.

Измельченные соцветия (50 г) *S. deltoides* экстрагировали 300 мл 70% этилового спирта на кипящей водяной бане с обратным холодильником в течение 2 ч. Спиртовой экстракт соцветий упаривали на роторном испарителе при температуре 70 °C до водного остатка и оставляли на 24 ч для кристаллизации тритерпеноидов. Затем отделяли осадок тритепреноидов от раствора центрифугированием при 6000 об./мин.

К остатку добавляли 20 мл хлороформа и смешивали с 10 г силикагеля. Смесь высушивали при комнатной температуре и наносили на колонку (4 × 20 см) с силикагелем (70–230 меш.). Разделение тритерпеноидов проводили в системе

растворителей гексан : ацетон, взятых в объемных соотношениях (20 : 1).

Собирали фракции по 10 мл. В результате получили 26 фракций. Объединяли фракции (1–6, 9–14), содержащие доминирующий тритерпеноид. Очистку доминирующих во фракциях 1–6 и 9–14 тритерпеноидов проводили перекристаллизацией из 30% этилового спирта, что позволило получить данные соединения в индивидуальном виде. В результате из надземной части (соцветия) *S. deltoides* выделили 3-*O*-ацетил-α-амирин (30.5 мг) и 3-*O*-ацетиллупеол (24.5 мг) соответственно.

ИК-спектры тритерпеноидов регистрировали на спектрофотометре Perkin Elmer Spectrum BX (США) в диапазоне 3500–800 см$^{-1}$, разрешение – 4 см$^{-1}$, в таблетке KBr.

Спектры ЯМР получены на спектрометре Bruker Avance-400 (США) с рабочей частотой 400 МГц в d$^6$-ДМСО.

*3-O-ацетил-α-амирин (1)*

$T_{пл}$ = 238–241 °C (лит. данные $T_{пл}$ = 238–240 °C) [11]; ИК-спектр (KBr, ν, см$^{-1}$): 2926, 2852, 1739, 1641, 1026; спектр ЯМР $^{13}$C (400 МГц, d$^6$-ДМСО, δ, м.д.): 40.6 (C-1), 27.9 (C-2), 82.4 (C-3), 40.9 (C-4), 56.6 (C-5), 19.6 (C-6), 34.2 (C-7), 41.3 (C-8), 49.0 (C-9), 38.2 (C-10), 24.6 (C-11), 125.7 (C-12), 141.0 (C-13), 43.4 (C-14), 29.5 (C-15), 27.9 (C-16), 35.1 (C-17), 60.4 (C-18), 41.0 (C-19), 41.2 (C-20), 32.6 (C-21), 42.9 (C-22), 30.3 (C-23), 17.1 (C-24), 18.1 (C-25), 18.2 (C-26), 24.2 (C-27), 30.2 (C-28), 18.9 (C-29), 22.8 (C-30), 171.1 (C-1'), 21.4 (C-2').

*3-O-ацетиллупеол (2)*

$T_{пл}$ = 214–217 °C (лит. данные $T_{пл}$ = 214–216 °C) [12]; ИК-спектр (KBr, ν, см$^{-1}$): 3073, 2926, 2852, 1739, 1641, 1026; спектр ЯМР $^{13}$C (400 МГц, d$^6$-ДМСО, δ, м.д.): 39.8 (C-1), 29.0 (C-2), 82.4 (C-3), 41.2 (C-4), 56.7 (C-5), 20.1 (C-6), 35.6 (C-7), 42.2 (C-8), 51.7 (C-9), 38.5 (C-10), 22.3 (C-11), 26.4 (C-12), 39.4 (C-13), 44.1 (C-14), 29.4 (C-15), 37.0 (C-16), 44.2 (C-17), 49.6 (C-18), 49.4 (C-19), 152.4 (C-20), 31.2 (C-21), 42.3 (C-22), 29.7 (C-23), 17.4 (C-24), 16.9 (C-25), 17.6 (C-26), 15.9 (C-27), 19.6 (C-28), 110.8 (C-29), 20.7 (C-30), 171.7 (C-1'), 21.4 (C-2').

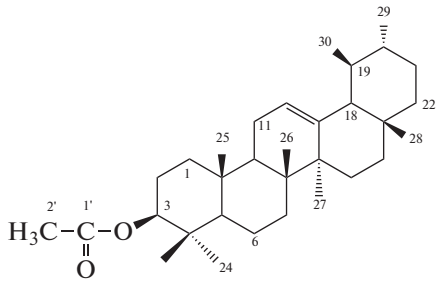
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом препаративной колоночной хроматографии на силикагеле в режиме изократического элюирования из экстракта соцветий *S. deltoides* выделили 2 кристаллических соединения белого цвета.

**Соединение 1.** В ИК-спектре выделенного соединения имеются полосы поглощения: 2926–2852 см$^{-1}$ (колебания алифатических групп), интенсивная полоса при 1739 см$^{-1}$ (колебания связи C=O ацетильной группы), 1641 см$^{-1}$ (колебания C=C-связи в молекуле тритерпеноида), 1026 см$^{-1}$ (колебания связи C–O спиртового остатка).

В ЯМР-$^{13}$C-спектре тритерпеноида в сильнопольной (17.1–60.4 м.д.) и слабопольной (125.7, 141.0 м.д.) частях спектра наблюдаются сигналы, химические сдвиги которых соответствуют справочным данным для α-амирина [7], за исключением сигнала при 82.4 м.д. (C-3), что обусловлено присутствием $CH_3CO$-группы (171.1, 21.4 м.д.) при C-3 в молекуле α-амирина. Для α-амирина, в котором OH-группа находится при C-3, характерен сигнал в ЯМР-$^{13}$C-спектре при 78.3 м.д. [7]. Сигналы при 125.7 и 141.0 м.д. характерны для C=C-связи при C-12 и C-13 в молекуле тритерпеноида. В сильнопольной части спектра присутствуют 8 сигналов – 30.3, 17.1, 18.1, 18.2, 24.2, 30.2, 18.9, 22.8 м.д., которые характерны для $CH_3$-групп при C-23, C-24, C-25, C-26, C-27, C-28, C-29 и C-30 в молекуле α-амирина соответственно.

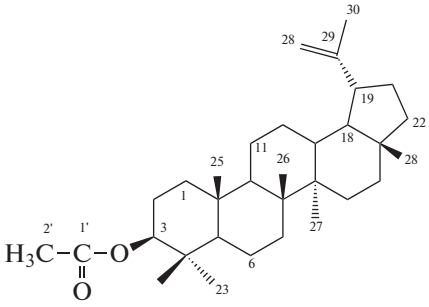
На основании данных ИК- и ЯМР-спектров установили, что выделенное соединение является 3-*O*-ацетил-α-амирином.




**Соединение 2.** В ИК-спектре соединения имеются полосы поглощения: 3073 см$^{-1}$ (колебания C=$CH_2$ винилиденовой группы), 2926–2852 см$^{-1}$ (колебания алифатических групп), интенсивная полоса при 1739 см$^{-1}$ (колебания связи C=O ацетильной группы), 1641 см$^{-1}$ (колебания C=C-связи в молекуле тритерпеноида), 1026 см$^{-1}$ (колебания связи C–O спиртового остатка).

В ЯМР-$^{13}$C-спектре исследуемого соединения наблюдаются 32 сигнала. Наиболее слабопольный сигнал 171.1 м.д. принадлежит атому C-1' ацетильной группы. Сигналы при 152.4 м.д. (C-20) и 110.8 м.д. (C-29) соответствуют атомам углерода винилиденовой группы. В сильнопольной части ЯМР-$^{13}$C-спектра наблюдается набор сигналов при 29.7, 17.4, 16.9, 17.6, 15.9, 19.6, 20.7 м.д., кото-

рые характерны для $CH_3$-групп при С-23, С-24, С-25, С-26, С-27, С-28 и С-30 в молекуле тритерпеноида соответственно. Сигнал при 21.4 м.д. принадлежит атому С-2' ацетильной группы. Сравнение других химических сдвигов сигналов в сильнопольной части спектра с литературными данными указывает, что выделенный тритерпеноид является 3-*O*-ацетиллупеолом [13].




Тритерпеноиды (3-*O*-ацетил-α-амирин, 3-*O*-ацетиллупеол) проявляют антипролиферативное действие на культуры раковых клеток толстой кишки и молочной железы [14]. Из надземной части *S. deltoides* тритерпеноиды (3-*O*-ацетил-α-амирин, 3-*O*-ацетиллупеол) выделены впервые.

## ВЫВОДЫ

Методом экстракции и препаративной колоночной хроматографии впервые из надземной части (соцветиях) *Synurus deltoides* (Ait.) Nakai выделены тритерпеноиды: 3-*O*-ацетил-α-амирин, 3-*O*-ацетиллупеол, идентификацию которых проводили методами ИК- и ЯМР-спектроскопии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шретер А.И.* 1975. Лекарственная флора советского Дальнего Востока. М. 328 с.
2. *Шретер А.И.* 2000. Целебные растения Дальнего Востока и их применение. Владивосток. 144 с.
3. *Государственная* фармакопея Российской Федерации XIII изд. 2015. М. 781 с. https://pharmacopoeia.ru/gosudarstvennaya-farmakopeya-xiii-online-gf-13-online
4. *Максимов О.Б., Горовой П.Г., Чумак Г.Н.* 1990. Содержание антиоксидантов в семенах некоторых видов флоры Приморского края. – Растительные ресурсы. 26(4): 487–498.
5. *Park J.H., Son K.H., Kim S.W., Chang H.W., Bae K., Kang S.S., Kim H.P.* 2004. Antiinflammatory activity of *Synurus deltoides*. – Phytother. Res. 18(11): 930–933. https://doi.org/10.1002/ptr.1595
6. *Jiang Y., Wang M.-H.* 2014. Ethanol extract of *Synurus deltoides* (Aiton) Nakai suppresses *in vitro* LPS-induced cytokine production in RAW 264.7 macrophages and *in vivo* acute inflammatory symptoms. – Nutr. Res. Pract. 8(1): 11–19. https://doi.org/10.4162/nrp.2014.8.1.11
7. *Lee H.Y., Min B.S., Son K.H., Chang H.W., Kim H.P., Kang S.S., Bae K.* 2006. Cerebrosides and triterpenoids from the roots of *Synurus deltoides*. – Nat. Prod. Sci. 12(4): 193–196. https://journaleng.kstudy.com/ISS_DownLoad.asp?a_code=05004189.pdf&inst=7002
8. *Gallo M.B.C., Sarachine M.J.* 2009. Biological activities of lupeol. – J. Biomed. Pharma. Sci. 3(1): 46–66.
9. *Simao da Silva K.A.B., Paszcuk A.F., Bento A.F., Meotti F.C., Calixto J.B.* 2011. Activation of cannabinoid receptors by the pentacyclic triterpene α,β-amyrin inhibits inflammatory and neuropathic persistent pain in mice. – Pain. 152(8): 1872–1887. https://doi.org/10.1016/j.pain.2011.04.005
10. *Мягчилов А.В., Горовой П.Г., Соколова Л.И.* 2020. Флавоноиды соцветий *Synurus deltoides*. – Химия природ. соединений. 56(2): 296–297. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42436745
11. *Abreu V.G.C., Takahashi J.A., Duarte L.P., Piló-Veloso D., Júnior P.A.S., Alves R.O., Romanha A.J., Alcântara A.F.C.* 2011. Evaluation of the bactericidal and trypanocidal activities of triterpenes isolated from the leaves, stems, and flowers of *Lychnophora pinaster*. – Rev. Bras. Farmacogn. 21(4): 615–621. https://doi.org/10.1590/S0102-695X2011005000095
12. *Javed S., Oise I.E., Nahar L., Ismail F.M.D., Mahmood Z., Sarker S.D.* 2016. Isolation, identification and antiproliferative activity of triterpenes from the genus *Monotheca* A. DC. – Records of Natural Products. 10(6): 782–787. https://www.acgpubs.org/doc/2018080808463492-RNP-1511-229.pdf
13. *Prachayasittikul S., Saraban P., Cherdtrakulkiat R., Ruchirawat S., Prachayasittikul V.* 2010. New Bioactive triterpenoids and Antimalarial activity of *Diospyros rubr*a Lec. – EXCLI J. 9: 1–10. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29255382
14. *De Los Reyes M.M., Oyong G.G., Ng V.A.S., Shen C.-C., Ragasa C. Y.* 2017. Cytotoxic Compounds from *Kibatalia gitingensis* (Elm.) Woodson. – Pharmacogn. J. 9(1): 8–13. https://doi.org/10.5530/pj.2017.1.2

# Triterpenoids in Inflorescences of *Synurus deltoides* (Asteraceae)

**A. V. Myagchilov**[a, b, *]

[a]*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

[b]*Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry FEB RAS, Vladivostok, Russia*

**e-mail: dfdfdf47@yandex.ru*

**Abstract**—*Synurus deltoides* (Ait.) Nakai (Asteraceae) is one of the least studied plants growing in the Russian Far East. It is known for its anti-inflammatory, antioxidant, diuretic and analgesic properties and is used in traditional medicine. *S. deltoides* contains triterpenoids that have a wide range of pharmacological activity, and therefore it can be considered as a promising source of biologically active compounds. The aerial part (inflorescences) of *S. deltoides* growing in the Primorsky region of the Far East of Russia was studied for the first time evaluated for the content of triterpenoids. Two compounds of the triterpenoid class – 3-*O*-acetyl-α-amyrin and 3-*O*-acetyllupeol, were isolated from the inflorescences by extraction with 70% ethanol and preparative column chromatography on silica gel in isocratic elution mode. The structure of the isolated compounds was proved by IR and NMR spectroscopy.

*Keywords: Synurus deltoides* (Ait.) Nakai, triterpenoids, 3-*O*-acetyl-α-amyrin, 3-*O*-acetyllupeol

## REFERENCES

1. *Shreter A.I.* 1975. [Medicinal plants of the Soviet Far East]. M. 328 p. (In Russian)
2. *Shreter A.I.* 2000. [Medicinal plants of the Far East and their use]. Vladivostok. 144 p. (In Russian)
3. [State Pharmacopoeia of the Russian Federation XIIth Ed]. 2015. M. 781 p. https://pharmacopoeia.ru/en/gosudarstvennaya-farmakopeya-xiii-online-gf-13-online
4. *Maksimov O.B., Gorovoi P.G., Chumak G.N.* 1990. The content of antioxidants in the seeds of some plant species of Primorsky Krai. – Rastitelnye resursy. 26(4): 487–498. (In Russian)
5. *Park J.H., Son K.H., Kim S.W., Chang H.W., Bae K., Kang S.S., Kim H.P.* 2004. Antiinflammatory activity of *Synurus deltoides*. – Phytother. Res. 18(11): 930–933. https://doi.org/10.1002/ptr.1595
6. *Jiang Y., Wang M.-H.* 2014. Ethanol extract of *Synurus deltoides* (Aiton) Nakai suppresses *in vitro* LPS-induced cytokine production in RAW 264.7 macrophages and *in vivo* acute inflammatory symptoms. – Nutr. Res. Pract. 8(1): 11–19. https://doi.org/10.4162/nrp.2014.8.1.11
7. *Lee H.Y., Min B.S., Son K.H., Chang H.W., Kim H.P., Kang S.S., Bae K.* 2006. Cerebrosides and triterpenoids from the roots of *Synurus deltoides*. – Nat. Prod. Sci. 12(4): 193–196. https://journaleng.kstudy.com/ISS_DownLoad.asp?a_code=05004189.pdf&inst=7002
8. *Gallo M.B.C., Sarachine M.J.* 2009. Biological activities of lupeol. – J. Biomed. Pharma. Sci. 3(1): 46–66.
9. *Simao da Silva K.A.B., Paszcuk A.F., Bento A.F., Meotti F.C., Calixto J.B.* 2011. Activation of cannabinoid receptors by the pentacyclic triterpene α,β-amyrin inhibits inflammatory and neuropathic persistent pain in mice. – Pain. 152(8): 1872–1887. https://doi.org/10.1016/j.pain.2011.04.005
10. *Myagchilov A.V., Gorovoy P.G., Sokolova L.I.* 2020. Flavonoids from inflorescences of *Synurus deltoides*. – Chemistry of Natur. Compounds. 56(2): 343-344. https://doi.org/10.1007/s10600-020-03026-x
11. *Abreu V.G.C., Takahashi J.A., Duarte L.P., Piló-Veloso D., Júnior P.A.S., Alves R.O., Romanha A.J., Alcântara A.F.C.* 2011. Evaluation of the bactericidal and trypanocidal activities of triterpenes isolated from the leaves, stems, and flowers of *Lychnophora pinaster*. – Rev. Bras. Farmacogn. 21(4): 615–621. https://doi.org/10.1590/S0102-695X2011005000095
12. *Javed S., Oise I.E., Nahar L., Ismail F.M.D., Mahmood Z., Sarker S.D.* 2016. Isolation, identification and antiproliferative activity of triterpenes from the genus *Monotheca* A. DC. – Records of Natural Products. 10(6): 782–787. https://www.acgpubs.org/doc/2018080808463492-RNP-1511-229.pdf
13. *Prachayasittikul S., Saraban P., Cherdtrakulkiat R., Ruchirawat S., Prachayasittikul V.* 2010. New Bioactive triterpenoids and Antimalarial activity of *Diospyros rubr*a Lec. – EXCLI J. 9: 1–10. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29255382
14. *De Los Reyes M.M., Oyong G.G., Ng V.A.S., Shen C.-C., Ragasa C. Y.* 2017. Cytotoxic Compounds from *Kibatalia gitingensis* (Elm.) Woodson. – Pharmacogn. J. 9(1): 8–13. https://doi.org/10.5530/pj.2017.1.2

**EDN:** IBWACG
*РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, 2022, том 58, вып. 2, с. 165–175*

## КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ

# ОСОБЕННОСТИ СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ХВОЕ *PINUS PUMILA* (PINACEAE) НА ХРЕБТЕ УДОКАН (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)

**© 2022 г. В. П. Макаров[1], *, С. В. Борзенко[1], Н. В. Помазкова[1], Т. В. Желибо[1]**
[1]*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия*
**e-mail: vm2853@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.11.2020 г.
После доработки 17.02.2021 г.
Принята к публикации 03.03.2022 г.

В статье представлены результаты исследования содержания химических элементов в хвое кедрового стланика *Pinus pumila* (Pall.) Regel, произрастающего в условиях высокогорного района севера Забайкальского края, вблизи Удоканского месторождения меди. Цель работы – оценить особенности содержания этих элементов в условиях высокогорья и мерзлотных почв, на фоне подготовки территории месторождения меди к эксплуатации, а также возможность использования хвои стланика в сельском хозяйстве, медицине и парфюмерии. Отбор растительных проб стланика проведен в широко распространенных в выбранном районе типах лиственничных лесов и кедрово-стланиковых сообществах. Установлено, что концентрации химических элементов в хвое стланика убывают в следующей последовательности: Mg > Al > Mn > Ba > Fe > Ti > Cu > Ni > V > Zn > Mo > Co > Cr > > Ag > As > Cd > Sr > Se > Sb > Pb > Hg > Be. Превышают величины кларка в хвое концентрации Al, Ti, Ag, V, Cr, Ba, Ni, Co, As, Mo, Se и Cu.В меньшей, чем кларк концентрации, накапливаются Cd, Sb, Fe, Hg, Mg, Mn, Zn, Be, Pb и Sr. Хвоя стланика характеризовалась повышенной концентрацией относительно установленных для кормления животных максимально-допустимых уровней (МДУ) по ряду элементов: Ni, Mo, Co, Cr, Ag, As и Cd. Использование хвои стланика в медицинской и парфюмерно-косметической промышленности ограничивает повышенное (в 1.3 раза относительно ПДК) содержание As.

*Ключевые слова: Pinus pumila*, хвоя, элементный состав, хребет Удокан, Забайкальский край
**DOI:** 10.31857/S003399462202008X

Информация о содержании химических элементов в растениях важна для использования растений в качестве лекарственного и кормового ресурса, геохимического исследования территории и оценки загрязнения окружающей среды, планирования мероприятий по повышению продуктивности и качества растительного сырья, селекции растений.

Ареал кедрового стланика *Pinus pumila* (Pall.) Regel охватывает обширные территории Восточной Сибири и Дальнего Востока. Его сообщества распространены от р. Лены до побережья Тихого океана и от Корейского п-ова, о-ва Хонсю, хребтов Большой и Малый Хинган, Тукурингра, Сихотэ-Алинь на север до Чукотки [1].

В Забайкальском крае кедровый стланик распространен на площади более 1.5 млн га, из которых 1.1 млн га сосредоточено в Каларском районе (29.7% от покрытой лесом площади района). Насаждения кедрового стланика имеют низкую производительность, средний класс бонитета – V, возраст – около 60 лет. Заросли этого вида встречаются не только в горах, но и в понижениях, занимая заболоченные участки речных долин [2].

Основная масса корней кедрового стланика сосредоточена в почве на глубине 0–30 см. Растение предпочитает породы кислого состава, хорошо растет на основных породах и избегает карбонатных пород. Почвы под кедровым стлаником короткопрофильны, скелетны, отличаются легким механическим составом. Общим является высокое содержание полуразложившихся растительных остатков в органогенном горизонте, кислая реакция среды, высокая гидролитическая и обменная кислотность, низкое содержание обменных оснований, высокое содержание обменного железа.

Под мертвопокровными сообществами формируются преимущественно эродированные почвы; под лишайниковыми, моховыми и мохово-лишай-

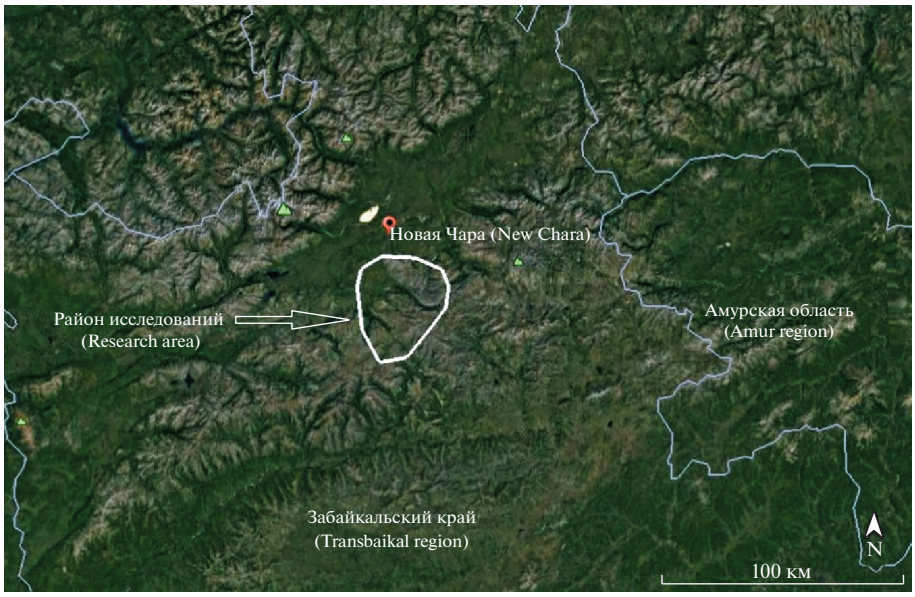



**Рис. 1.** Расположение района исследований.
**Fig. 1.** Location of the study area.

никовыми – почвы подзолистого типа; под сфагновыми – торфянисто-перегнойные таежно-мерзлотные почвы на многолетней мерзлоте [3].

Кедровый стланик является ценным пищевым растением, используется в фармацевтическом производстве, в качестве кормовых добавок для животных, имеет большое значение как кормовой ресурс для диких млекопитающих и птиц, сдерживает эрозионные процессы на крутых склонах [4–9]. Эфирное масло кедрового стланика рекомендовано для использования в медицине и других отраслях промышленности. Содержание α-пинена в кедровом стланике в два-три раза больше, чем в эфирном масле пихты белокорой и сосны кедровой корейской. Эфирное масло кедрового стланика испытано в качестве биоактивной добавки к разным товарам народного потребления [8, 10].

Экстракт из хвои кедрового стланика обладает антибактериальной активностью по отношению к росту и развитию *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 [9]. Семена, почки, веточки, хвоя и корни *P. pumila* используются в народной медицине для приготовления мочегонных, антигельминтных, отхаркивающих, дезинфицирующих и ранозаживляющих средств [11, 12].

В районе исследований разрабатывается крупнейшее в мире Удоканское месторождение меди. В этих условиях важно знать особенности элементного состава кедрового стланика для формирования представлений о диапазоне накопления им химических элементов в различных экологических условиях; использования полученной информации для мониторинга загрязнения окружающей среды и оценки возможности использования в качестве кормового, лекарственного растения. Ранее такие исследования в районе не проводились.

Цель исследований – выявить особенности накопления ряда химических элементов в хвое кедрового стланика в высокогорных условиях севера Забайкалья.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в Каларском р-не Забайкальского края, в районе хребта Удокан. Пробные площади расположены южнее поселка Новая Чара (рис. 1).

Руды Удоканского месторождения комплексные, кроме меди в них присутствуют Mo, Ni, Co, Zn, Pb, Bi, Hg, As, Ag, Au, Pt и Pd. Основная форма элементов в рудах – собственные минералы [13]. Геохимической особенностью месторождения является относительно низкое содержание большинства элементов. Ванадий, серебро, хром отмечаются в количествах близких к кларку. В меньших количествах встречаются марганец, титан, свинец, цинк, кобальт, никель, бериллий. Превышают кларки висмут и золото [14].

Территория отличается сильно расчлененным высокогорным рельефом и наличием мощной толщи многолетнемерзлых пород. Характер распространения многолетнемерзлых пород существенно сказывается на химическом составе под-

земных и поверхностных вод региона. По химическому составу воды чаще гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые и натриевые с минерализацией до 100 мг/л и pH до 6.8, с повышенными содержаниями таких микроэлементов, как медь, никель, железо, марганец. В речных водах района исследований обнаружены в аналитически определяемых концентрациях ртуть (до 0.1 мкг/л), серебро (0.12 мкг/л) и кадмий (0.26 мкг/л). Источником этих элементов в водах являются горные породы и руды, взаимодействие воды с которыми и приводит к накоплению многих металлов в водах района исследования [15].

Содержание подвижных элементов почве проводили в районе исследований в тот же период, что отбор растительных проб, однако участки отбора не совпадали. Среднее содержание подвижных элементов в почвах в районе исследований находилось в следующем соотношении: Fe > Al > > Mn > Cu > Zn > Ti ≫ As > V > Ba > Co > Ni > Pb > > Hg > Sr > Sb > Cd > Cr > Mo > Se > Ag > Be [16].

Географические координаты расположения пробных площадей и высоту над уровнем моря определяли с помощью спутникового навигатора, угол склона с помощью клинометра геологического компаса. Отбор хвои проводили в июне и августе 2011 года в сообществах кедрового стланика и широко распространенных типах лиственничных лесов (табл. 1). Хвою кедрового стланика отбирали на пробной площади с побегов 2–3 года жизни с 5–6 растений в тканевые мешки и подсушивали до воздушно-сухого состояния. Затем образцы хвои были переданы для дальнейшей обработки и химического анализа в лабораторию Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (ИПРЭК СО РАН).

Методика определения содержания химических элементов была следующей. Навески 5 г (с точностью 0.00001 г) помещали в фарфоровые чашки и ставили в холодную муфельную печь, затем постепенно нагревали. Сухое озоление проводили при температуре 450–500 °C, в течение 5–8 ч (от достижения температуры в муфельной печи 450 °C).

Для окисления остатков органического материала в золе применяли 30%-ную $H_2O_2$. Золу массой 5 г в чашке растворяли в 1–2 мл $H_2O_2$ и выпаривали на кипящей водяной бане досуха. Обработку $H_2O_2$ повторяли от 1 до 3 раз до исчезновения угольков озоляемого материала.

Затем содержимое чашки растворяли в 10%-ной HCl, и фильтровали через фильтр “белая лента” (диаметр 7 см, беззольный, пористость 3 мкм) в мерную колбу емкостью 100 мл. Массовую концентрацию металлов определяли методами атомной спектрометрии на атомно-абсорбционном спектрофотометре SOLAAR M6 (Termo Electron Corporation, США) согласно нормативным документам ГОСТ 17.1.3.07-82 [17], ГОСТ 31861–2012 [18], ГОСТ 27384–2002 [19], ГОСТ 31870-2012 [20] ПНД Ф 14.1:2:4.138-98 [21].

Для определения кальция, стронция и магния применяли метод атомно-абсорбционной спектрометрии с атомизацией в пламени закись азота–ацетилен (Ca, Sr) и в пламени воздух–ацетилен (Mg). Натрий и калий определяли методом пламенно-эмиссионной спектрометрии. Методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией устанавливали массовую концентрацию микроэлементов (алюминий, железо, кадмий, кобальт, марганец, медь, мышьяк, никель, свинец, цинк). Градуировку спектрометра проводили с применением государственных стандартных образцов ГСО 7772-2000, ГСО 7783-2000, ГСО 7767-2000, ГСО 7775-2000, ГСО 7771-2000, ГСО 7272-96, ГСО 7325-96.

Для определения содержания ртути пробы растительных образцов разлагали $H_2O_2$ и $H_2SO_4$ при температуре 60 °C и $KMnO_4$ + $(NH_2OH)_2 \cdot H_2SO_4$ [22]. Ртуть в растворах восстанавливали $SnCl_2$ до элементарного состояния и анализировали методом “холодного пара” на приборе Lab Analyzer-254 фирмы Mercury Instruments. Предел обнаружения 20 мкг/кг [23].

Статистическую обработку данных проводили с использованием корреляционного и дисперсионного анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрации химических элементов в хвое кедрового стланика в районе исследований отличались от их среднего содержания элементов в наземных растениях (кларков). Превышает кларки содержание в хвое (в порядке убывания) таких элементов, как Al, Ti, Ag, V, Cr, Ba, Ni, Co, As, Mo, Se и Cu. Особенно значительно (в десятки раз) превышало кларки содержание в хвое Al, Ti, Ag. Более низким, чем кларк, оказалось содержание Cd, Sb, Fe, Hg, Mg, Mn, Zn, Be, Pb и Sr. Очень низким накоплением по отношению к кларкам (до 7%) характеризовались Zn, Be, Pb и Sr (табл. 2).

Исследования по накоплению химических элементов ранее проводились в других районах Сибири и Дальнего Востока. Например, в районе Верхней Колымы в хвое кедрового стланика содержание Mg составило 2200, Al – 1100, Mn – 1400 мг/кг [25]. Эти величины значительно больше, чем в районе хребта Удокан. В Магаданской области содержание в хвое стланика Cu составля-

**Таблица 1.** Характеристика пробных площадей
**Table 1.** Sample plots characteristics

| Пробная площадь Sample plot | Координаты Coordinates | Высота над у. м., м Elevation above msl, m | Экспозиция склона Slope exposure | Крутизна склона, ° Degree of slope, ° | *Pinus pumila* | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | проективное покрытие, % projective cover, % | высота, м height, m |
| Кедрово-стланиковое сообщество Dwarf–Siberian pine community | | | | | | |
| 6 | 56.578° N 118.510° E | 1454 | Восточная Eastern | 15 | 70 | 1.5 |
| 16 | 56.619° N 118.430° E | 1578 | Западная Western | 20 | 50 | 1.3 |
| 81 | 56.342° N 118.283° E | 1680 | Западная Western | 30 | 30 | 1.2 |
| 99 | 56.373° N 118.294° E | 1479 | Северная Northern | 20 | 30 | 1.5 |
| 107 | 56.354° N 118.254° E | 1757 | Южная Southern | 20 | 20 | 1.0 |
| 111 | 56.373° N 118.243° E | 1523 | Западная Western | 20 | 50 | 1.6 |
| Лиственничник кедрово-стланиковый Larch–dwarf Siberian pine forest community | | | | | | |
| 19 | 56.554° N 118.418° E | 1135 | – | 0 | 30 | 2.0 |
| 20 | 56.564° N 118.429° E | 1238 | – | 0 | 70 | 1.8 |
| 21 | 56.582° N 118.366° E | 1161 | Юго-западная South western | 20 | 30 | 2.2 |
| 25 | 56.615° N 118.254° E | 1107 | – | 0 | 30 | 2.0 |
| Лиственничник ерниковый Larch–dwarf birch forest community | | | | | | |
| 15 | 56.605° N 118.434° E | 1612 | – | 0 | 40 | 1.5 |
| 75 | 56.607° N 118.287° E | 1188 | Северная Northern | 5 | 20 | 2.0 |
| 89 | 56.353° N 118.310° E | 1393 | Юго-западная South western | 5 | 20 | 1.7 |
| Лиственничник грушанковый Larch–wintergreen forest community | | | | | | |
| 8 | 56.577° N 118.514° E | 1465 | – | 0 | 5 | 1.7 |
| Лиственничник ольховниковый Larch–alder shrub forest community | | | | | | |
| 94 | 56.569° N 118.502° E | 1493 | – | 0 | 10 | 1.5 |

**Таблица 2.** Концентрация химических элементов в хвое кедрового стланика, мг/кг
**Table 2.** Elements content in dwarf Siberian pine needles, mg/kg

| Элемент Element | Кларк элемента в растениях*, мг/кг Clarkes of elements in plants*, mg/kg | Среднее содержание подвижных элементов в почве района исследований **, $M_{ср} \pm m$ Average content of mobile nutrients in the soil of the study area, ** $M_{ср} \pm m$ | Среднее по растительным сообществам, $n = 15$ Average for plant communities, $n = 15$ | | | Кедрово-стланиковое сообщество, $n = 6$ Dwarf–Siberian pine community, $n = 6$ | Лиственничник кедрово-стланиковый, $n = 4$ Larch–dwarf Siberian pine forest community, $n = 4$ | Лиственничник ерниковый, $n = 3$ Larch–dwarf birch forest community $n = 3$ | Лиственничник грушанковый, $n = 1$ Larch–wintergreen forest community, $n = 1$ | Лиственничник ольховниковый, $n = 1$ Larch–alder shrub forest community, $n = 1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $M_{ср} \pm m$ | min–max | $CV$, % | $M_{ср} \pm m$ | $M_{ср} \pm m$ | $M_{ср} \pm m$ | $M_{ср}$ | $M_{ср}$ |
| Mg | 3200.0 | – | 700 ± 76 | 272–1230 | 43 | 830 ± 115 | 540 ± 60 | 500 ± 156 | 552 | 1230 |
| Al | 0.5–4000 | 31 ± 4 | 95 ± 4 | 56–110 | 17 | 98 ± 2 | 95 ± 13 | 82 ± 13 | 104 | 98 |
| Mn | 630.0 | 45 ± 7 | 90 ± 13 | 32–250 | 55 | 100 ± 7 | 55 ± 15 | 140 ± 57 | 111 | 61 |
| Ba | 14.0 | 0.45 ± 0.04 | 49 ± 3 | 34–71 | 23 | 42 ± 3 | 53 ± 5 | 55 ± 7 | 39 | 71 |
| Fe | 140.0 | 320 ± 42 | 40 ± 10 | 13–177 | 99 | 24 ± 5 | 39.1 ± 0.1 | 80 ± 50 | 40 | 22 |
| Ti | 1.0 | 0.87 ± 0.11 | 33 ± 3 | 8–50 | 37 | 38 ± 3 | 25 ± 6.0 | 26 ± 9 | 50 | 37 |
| Cu | 14.0 | 4.7 ± 1.2 | 16 ± 3 | 5–52 | 70 | 14 ± 1 | 11 ± 2 | 18 ± 6 | 15 | 52 |
| Ni | 3.0 | 0.27 ± 0.03 | 10 ± 2 | 2–18 | 60 | 10 ± 2 | 14 ± 2 | 8 ± 5 | 2 | 18 |
| V | 1.6 | 0.55 ± 0.04 | 8 ± 3 | 1–41 | 165 | 13 ± 7 | 1.6 ± 0.0 | 2.6 ± 0.6 | 2 | 24 |
| Zn | 100.0 | 1.7 ± 0.3 | 7 ± 1 | 3–21 | 65 | 7.6 ± 0.9 | 3.4 ± 0.8 | 6.3 ± 1.5 | 6 | 21 |
| Mo | 0.9 | 0.008 ± 0.001 | 2.2 ± 0.6 | 0.5–7.0 | 88 | 1.0 ± 0.2 | 1.7 ± 0.2 | 4.8 ± 1.5 | 2 | 2 |
| Co | 0.5 | 0.78 ± 0.14 | 1.7 ± 0.5 | 0.1–6.3 | 123 | 1.6 ± 0.9 | 1.1 ± 0.4 | 1.5 ± 0.8 | 6 | 0.2 |
| Cr | 0.23 | 0.032 ± 0.002 | 0.87 ± 0.17 | 0.06–1.74 | 75 | 0.45 ± 0.16 | 1.69 ± 0.05 | 0.86 ± 0.40 | 0.94 | 0.13 |
| Ag | 0.06 | 0.053 ± 0.006 | 0.77 ± 0.42 | 0.01–4.64 | 212 | 0.71 ± 0.70 | 0.010 ± 0.000 | 1.5 ± 1.5 | 0.01 | 2.52 |
| As | 0.2 | 0.62 ± 0.12 | 0.65 ± 0.13 | 0.52–2.52 | 79 | 0.85 ± 0.33 | 0.52 ± 0.00 | 0.52 ± 0.00 | 0.52 | 0.52 |
| Cd | 0.6 | 0.25 ± 0.09 | 0.35 ± 0.19 | 0.02–2.84 | 211 | 0.29 ± 0.17 | 0.74 ± 0.70 | 0.11 ± 0.05 | 0.06 | 0.22 |
| Sr | 26.0 | 1.5 ± 0.7 | 0.12 ± 0.06 | 0.02–0.96 | 204 | 0.19 ± 0.15 | 0.07 ± 0.05 | 0.10 ± 0.09 | 0.08 | 0.017 |
| Se | 0.2 | 0.014 ± 0.003 | 0.10 ± 0.00 | 0.10–0.10 | 0 | 0.10 ± 0.00 | 0.100 ± 0.000 | 0.100 ± 0.000 | 0.1 | 0.1 |
| Sb | 0.06 | 0.022 ± 0.003 | 0.10 ± 0.00 | 0.10–0.10 | 0 | 0.099 ± 0.000 | 0.099 ± 0.000 | 0.099 ± 0.000 | 0.099 | 0.099 |
| Pb | 2.7 | 0.20 ± 0.02 | 0.02 ± 0.00 | 0.02–0.02 | 0 | 0.02 ± 0.00 | 0.02 ± 0.00 | 0.02 ± 0.00 | 0.018 | 0.018 |
| Hg | 0.015 | 0.05 ± 0.01 | 0.004 ± 0.001 | 0.002–0.010 | 62 | 0.004 ± 0.001 | 0.01 ± 0.00 | 0.003 ± 0.001 | 0.004 | 0.002 |
| Be | 0.1 | 0.002 ± 0.00 | 0.002 ± 0.000 | 0.002–0.002 | 0.0 | 0.002 ± 0.000 | 0.002 ± 0.000 | 0.002 ± 0.000 | 0.002 | 0.002 |

Примечание: $M \pm m$ – среднее значение и стандартная ошибка; Min–max – диапазон значений; $V$ – коэффициент вариации. * По [24]. ** По [15]. Прочерк означает отсутствие данных.
Note: $M \pm m$ – mean and standard error; Min–max – the range of values; $V$ – the coefficient of variation. * According to [24]. ** According to [15]. Dash – no data.

ло 2.5 мг/кг. Такая величина 6–7 раз меньше накопления элемента в районе хребта Удокан. В то же время содержание Zn, Mn и Fe в Магаданской области было в 4–9 раз больше, чем в районе наших исследований [26]. В Бурятии накопление в хвое стланика Pb и Hg было значительно больше, чем в районе Удокана – в среднем в 60–140 раз, накопление Mn, Fe, Zn было больше в 2–8 раз. В то же время, содержание Cu было ниже в 2 раза, а Ni – в 14 раз [27].

Доказано, что хвою кедрового стланика можно использовать в качестве кормовой добавки в рационах крупного рогатого скота [4, 5]. При использовании хвои стланика в качестве кормовой добавки в районе хребта Удокан важно учитывать, что средние концентрации в ней Ni, Mo, Co, Cr, Ag, As и Cd превышали максимально-допустимые уровни (МДУ), установленные для грубых и сочных кормов в 1.1–3.5 раза [28]. Очень низкое содержание Zn в хвое также неблагоприятно, поскольку из-за недостатка этого элемента в рационе животных у них развивается такое заболевание, как паракератоз. Дефицит в организме животных Be, Pb и Sr не влияет на здоровье животных.

Согласно “ОФС.1.5.3.0009.15 Определение содержания тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах”, предельно допустимое содержание Pb, Cd, Hg и As в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах не должно быть больше установленных предельно-допустимых концентраций (ПДК). В исследованном районе только содержание As незначительно (в 1.3 раза) превышает ПДК в хвое.

Содержание ряда химических элементов в хвое стланика достоверно различалось в разных растительных сообществах. Например, в кедрово-стланиковых сообществах в хвое кедрового стланика содержание Mg было достоверно больше, чем в лиственничниках кедрово-стланиковых ($F = 8.54$; $P < 0.05$) и напротив, накопление Fe было более низким ($F = 5.61$; $P < 0.05$) В лиственничниках кедрово-стланиковых отмечено большее, содержание Cr ($F = 37.02$; $P < 0.05$) и меньшее накопление Mn ($F = 8.39$; $P < 0.05$) и Zn ($F = 10.77$; $P < 0.05$), чем в других типах сообществ. В хвое стланика лиственничников ерниковых отмечено наиболее высокое содержание Mo ($F = 11.12$; $P < 0.05$).

Отбор хвои в лиственничниках грушанковом и ольховниковом был проведен только на одной пробной площади. Можно отметить, что накопление в хвое стланика Mg, Ba, Cu, V, Zn и Ag в лиственничнике ольховниковом значительно превышало средние величины в других растительных сообществах. В лиственничнике грушанковом в хвое стланика выявлено значительно больше, чем в других сообществах содержание Co. Однако для доказательства этих фактов требуются дополнительные исследования.

Концентрации химических элементов в хвое стланика в большинстве случаев значительно варьировали в зависимости от места отбора проб. Коэффициент вариации накопления большинства исследованных элементов в хвое был очень высокий – CV > 40%. Особенно значительной вариацией накопления (CV > 100%) отличались V, Co, Ag, Cd и Sr. Относительно низким варьированием (V < 40%) характеризовалось содержание в хвое Al, Ba и Ti. Не отличались в зависимости от места произрастания концентрации в хвое стланика Se, Sb, Pb и Be (табл. 2).

Обнаружена статистически значимая тенденция увеличения или снижения концентрации химических элементов в зависимости от абсолютной высоты места произрастания. Например, с увеличением абсолютной высоты наблюдается повышение в хвое стланика концентрации Mg ($r = 0.53$; $P < 0.05$), Zn ($r = 0.53$; $P < 0.05$), Ti ($r = 0.68$; $P < 0.05$) и V ($r = 0.57$; $P < 0.05$) и, напротив, снижение концентрации Cr ($r = -0.67$; $P < 0.05$).

Известно, что между элементами существует взаимодействие – синергизм и антагонизм. Синергизм проявляется в усилении влиянии на состояние растений совместного действия 2-х и более элементов. Антагонизм приводит к тому, что усвоение растениями какого-либо элемента ухудшается. Кроме перечисленных групп химических элементов, выделяют еще группу так называемых “блокировщиков”, которые не ухудшают усвоение другого элемента, а полностью его блокирует. Уровень таких взаимодействий напрямую зависит от характеристик почвы, ее кислотности и состава; окружающей температуры; процентного соотношения питательных элементов. Нами определены статистически достоверные ($P < 0.05$) коэффициенты корреляции концентраций 15 химических элементов в хвое стланика (табл. 3).

По числу образованных связей элементы можно расположить в следующем порядке: Mg > Zn > > Fe = V = Cr > Cu = Mo = Ba > Ni = Hg = Al > Co = = Ti = Ag = Sr. Количество пробных площадей, на которых был проведен отбор растительных проб, относительно невелико, поэтому полученные данные можно рассматривать как предварительные. Закономерности взаимодействия элементов могут измениться при большем массиве данных.

Концентрация большинства химических элементов в хвое стланика была больше содержания подвижных элементов в почве. Особенно Mo (в

**Таблица 3.** Коэффициент корреляции Пирсона между содержанием химических элементов в хвое кедрового стланика
**Table 3.** Pearson's correlation coefficient between the content of chemical elements in dwarf Siberian pine needles

| Элемент | Mg | Sr | Ba | Fe | Zn | Ni | Hg | Al | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fe | –0.60 | | | | | | | | |
| Zn | 0.70 | | | | | | | | |
| Cu | | | 0.59 | | 0.89 | | | | |
| Ni | | | 0.60 | | | | | | |
| Co | | | | | | –0.65 | | | |
| Hg | | | | | –0.55 | | | | |
| Al | | | –0.64 | | | | | | |
| Ti | | | | –0.56 | | | | | |
| V | 0.70 | 0.63 | | | 0.59 | | | | |
| Mo | –0.64 | | | 0.60 | | | | –0.73 | |
| Cr | –0.74 | | | | –0.68 | | 0.75 | | –0.55 |
| Ag | | | | 0.57 | | | | | |

275 раз), а также Ti, Ni, Cr, V и Ag (в 14–38 раз). Концентрации других химических элементов превышали содержание в почве в 2–7 раз. Содержание в хвое Fe, Sr, Pb и Hg было меньше содержания подвижных элементов в почве в 8–12 раз.

Таким образом, на концентрацию химических элементов в хвое стланика влияет ряд факторов, преимущественно связанных с экологическими условиями произрастания. Это высота над уровнем моря, крутизна склона, тип растительного сообщества, содержание химических элементов в почве, избирательная способность растения к поглощению элементов,а также взаимодействие элементов между собой.

## ВЫВОДЫ

1. Концентрации химических элементов в хвое кедрового стланика *Pinu spumila* (Pall.) Regel, произрастающего в районе хребта Удокан (Забайкальский край) значительно отличались от кларков, установленных для наземных растений и содержания элементов в хвое стланика в других регионах Сибири и Дальнего Востока.

2. Содержание в хвое кедрового стланика ряда элементов (Mg, Fe, Cr, Mn, Zn, Mo) имело существенные различия в разных типах растительных сообществ, что свидетельствует о неоднородности геохимических условий местопроизрастания стланика.

3. Хвоя кедрового стланика в условиях хребта Удокан характеризуется более высоким накоплением, по отношению к содержанию в почве, таких элементов, как Mo, Ti, Ni, Cr, Vи Ag.

4. Использование хвои кедрового стланика в качестве кормовой добавки животным может ограничивать повышенное содержание в ней ряда элементов (Ni, Mo, Co, Cr, Ag, As и Cd).

5. Использование хвои в фармацевтической и парфюмерно-косметической промышленности возможно, но с учетом ПДК As.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нешатаева В.Ю.* 2011.Сообщества кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) полуострова Камчатка. – Растительность России. 19: 71–100.
https://doi.org/10.31111/vegrus/2011.19.71
2. *Филиппова Е.В., Бобринев В.П., Пак Л.Н.* 2015. Особенности биологии кедрового стланика (*Pinu spumila*) на севере Забайкалья. – Вестник ЗабГУ. 6: 44–49.
https://elibrary.ru/item.asp?id=24333937
3. *Моложников В.Н.* Кедровый стланик горных ландшафтов Северного Прибайкалья. 1975. М. 204 с.
4. *Кузьмина И.Ю.* 2017.Экономическая эффективность применения кормовой добавки из стланика, лишайников и микроэлементов в рационах крупного рогатого скота в Магаданской области. – Современные тенден-

ции развития науки и технологий. 3-1: 114–119.
https://apni.ru/media/Sb_k-3-1_aDwk8NW.pdf

5. *Кузьмина И.Ю.* 2019.Влияние кормовой добавки из кедрового стланика и лишайников на организм телят. – Ветеринария. 6: 52–54.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38073537
6. *Домрачев Д.В., Карпова Е.В., Горошкевич С.Н., Ткачев А.В.* 2011. Сравнительный анализ летучих веществ из хвои пятихвойных сосен северной и восточной Евразии. – Химия растительного сырья. 4: 89–98.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17289474
7. *Эрдынеева С.А., Ширеторова В.Г., Тараскин В.В., Раднаева Л.Д.* 2020.Сравнительное исследование компонентного состава эфирных масел *Pinus pumila* (Pall) Regel Прибайкальской и Якутской популяций. Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 23–9: 19–25.
https://doi.org/10.29296/25877313-2020-09-03
8. *Выводцев Н.В., Джумаев М.А., Тагильцев Ю.Г., Колесникова Р.Д.* 2011. Кедровый стланик: распространение, экология, использование. – Вестник Тихоокеанского государственного университета. 1 (20): 115–124.
https://pnu.edu.ru/media/vestnik/articles/509.pdf
9. *Сивцева С.В., Охлопкова Ж.М.* 2018.Антибактериальная активность и цитотоксический анализ экстрактов из фитомассы дикорастущих растений Якутии. – Вестник СВФУ. 3(65): 24–38.
https://www.s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/dnii/vestnik-svfu/arkhiv/arkhiv-2018/Вестник%20СВФУ%203%20(65)% 202018.pdf
10. *Лобкович В.Э., Шраменок Т.В.* Зубная паста с маслом кедрового стланика. Патент на изобретение RU 2280434 C2, 27.07.2006. Заявка № 2004124913/15 от 05.08.2004.
https://patenton.ru/patent/RU2280434C2.pdf
11. *Васильева А.Г., Чирикова Н.К.* 2020.Биологически активные вещества хвои кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel). – Медико-фармацевтический журнал пульс. 22(7): 68–72.
https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-7-68-72
12. *Shpatov A.V., Popov S.A., Salnikova O.I., Shmidt E.N., Kang S.W., Kim S.M., Um B.H.* 2013. Lipophilic extracts from needles and defoliated twigs of *Pinus pumila* from two different populations. – Chem. Biodivers. 10(2): 198–208.
https://doi.org/10.1002/cbdv.201200009
13. *Пелымский Г.А., Лаптева Н.И.* 2010. Благородные металлы в рудах Удокана. – Жизнь Земли. 32: 88–91.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29865217
14. *Зиновьев Ю.И.* 2009. Геохимические особенности Сакуканских отложений и медных руд Удокана. – Горный информационно-аналитический бюллетень. S3: 63–68.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13102615
15. *Замана Л.В., Усманов М.Т., Борзенко С.В.* 2007. Гидрогеохимия рек по трассе проектируемого нефтепровода “Восточная Сибири-Тихий океан” в междуречье Витим-Олекма. – Водные ресурсы. 3: 345–355.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9516689
16. *Макаров В.П., Михеева Н.Ю., Борзенко С.В.* 2021. Содержание химических элементов в почвах на территории Удоканского месторождения меди. – Агрохимия. 9: 50–61.
https://doi.org/10.31857/S0002188121090088
17. *ГОСТ 17.1.3.07-82.* Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. 2001. М. 10 с.
https://docs.cntd.ru/document/1200012472
18. *ГОСТ 31861–2012.* Межгосударственный стандарт. Вода. Общие требования к отбору проб. 2013. М. 32 с.
https://docs.cntd.ru/document/1200097520
19. *ГОСТ 27384–2002.* Межгосударственный стандарт. Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств. 2010. М. 6 с.
https://docs.cntd.ru/document/1200030884
20. *ГОСТ 31870-2012.* Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектрометрии. 2013. М. 25 с. https://docs.cntd.ru/document/1200097409
21. *ПНД Ф 14.1:2:4.138-98.* Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций калия, лития, натрия и стронция в пробах питьевых, природных и сточных вод методом пламенно-эмиссионной спектрометрии. 2010. М. 18 с.
https://docs.cntd.ru/document/556339180
22. *Методика определения* микроэлементов в почвах, растениях и воде. 1974. М. 284 с.
23. *Унифицированные методы* мониторинга фонового загрязнения природной среды. 1986. М. 182 с.
24. *Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.И., Прохоров В.Г.* Справочник по геохимии. 1990. М. 480 с.

25. *Пугачев А.А.* 2011. Элементы биологического круговорота в экосистемах кедрового стланика Верхней Колымы. – Лесоведение. 1: 13–18.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16310983

26. *Кузьмина И.Ю.* 2015.Влияние кормовой добавки из стланика, лишайников и микроэлементов на морфологические показатели крови крупного рогатого скота в Магаданской области. – Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков. 9: 128–131.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23094380

27. *Эрдынеева С.А., Ширеторова В.Г., Раднаева Л.Д.* 2019. Особенности накопления тяжелых металлов деревьями хвойных пород Республики Бурятия. – Проблемы устойчивого развития региона: IX школа-семинар молодых ученых России, посвященная 70-летию академика РАН Арнольда Кирилловича Тулохонова, Улан-Удэ, 03–07 июля 2019 года. – Улан-Удэ. С. 170–175.
https://www.binm.ru/books/2019/02_School_IX.pdf

28. *Временный* максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. 1987.
https://fsvps.gov.ru/fsvps/download/attachment/145066/mdu.pdf

# Some Aspects of the Chemical Elements Content in the Needles of *Pinus pumila* (Pinaceae) from the Udokan Ridge (Transbaikalia)

**V. P. Makarov[a, *], S. V. Borzenko[a], N. V. Pomazkova[a], T. V. Zhelibo[a]**

[a]*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia*

**e-mail: vm2853@mail.ru*

**Abstract**—The article presents the results of the study of the chemical elements content in dwarf Siberian pine (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) needles from the high-mountain area of the Northern Transbaikalia near the Udokan copper deposit. The research was focused on the assessment of the specificity of elements content in the high altitude environments and permafrost soils amid the preparation of the territory of the copper deposits development, and the prospects of using the dwarf Siberian pine needles in agriculture, medicine, and perfumery. Sampling of the dwarf Siberian pine needles was carried out in the most typical larch forest and dwarf Siberian pine communities of the study area in June and August 2011. The needle samples were analyzed according to the approved methods using modern devices and equipment in the laboratory of the Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPREC SB RAS). It was found that chemical element concentrations in dwarf Siberian pine needles decrease in the following sequence: Mg > Al > Mn > Ba > Fe > Ti > Cu > Ni > V > Zn > Mo > Co > Cr > > Ag > As > Cd > Sr > Se > Sb > Pb > Hg > Be. In needles, concentrations of Al, Ti, Ag, V, Cr, Ba, Ni, Co, As, Mo, Se, and Cu are greater than clarkes, and of Cd, Sb, Fe, Hg, Mg, Mn, Zn, Be, Pb, and Sr – less than clarkes. Dwarf Siberian pine needles have higher content of Ni, Mo, Co, Cr, Ag, As, and Cd than the maximum allowable concentrations (MAC) specified for animal feedstuff. The use of dwarf Siberian pine needles in the medical, and perfume and cosmetic production is limited by the increased As content exceeding maximum allowable concentration 1.3 times. The results of the work can be used to monitor environmental pollution, and should be considered when using dwarf Siberian pine needles as animal feed additive, and ash for the production of medicinal and perfumery substances.

*Keywords: Pinus pumila*, needles, elemental composition, Udokan ridge

## REFERENCES

1. *Neshataeva V.Yu.* 2011. Siberian dwarf-pine (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) communities in the Kamchatka Peninsula. – Rastitel'nost' Rossii. 19: 71–100.
https://doi.org/10.31111/vegrus/2011.19.71 (In Russian)

2. *Filippova E.V., Bobrinev V.P., Pak L.N.* 2015. [Features of *Pinus pumila* biology in the North of Transbaikalia]. – Transbaikal State University J. 6: 44–49.
https://elibrary.ru/item.asp?id=24333937 (In Russian)

3. *Molozhnikov V.N.* 1975. [*Pinus pumila* of the Northern Baikal region mountain landscapes]. Moscow. 204 p. (In Russian)

4. *Kuz'mina I.Yu.* 2017. [Economic efficiency of the application of the feed supplement made from *Pinus pumila*, lichens and trace elements in cattle nutrition in the Magadan region]. – Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii. 3–1: 114–119.
https://apni.ru/media/Sb_k-3-1_aDwk8NW.pdf (In Russian)

5. *Kuz'mina I.Yu.* 2019. [Influence of feed supplement from mountain pine and lichens on the organism of calves]. – Veterinariya. 6: 52–54.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38073537 (In Russian)
6. *Domrachev D.V., Karpova E.V., Goroshkevich S.N., Tkachev A.V.* 2012. Comparative analysis of volatiles from needles of the five-needle pines of northern and eastern Eurasia. – Russ. J. Bioorg. Chem. 38(7): 780–789.
http://doi.org/10.1134/S1068162012070059
7. *Erdyneeva S.A., Shiretorova V.G., Taraskin V.V., Radnaeva L.D.* 2020. A comparative study of *Pinus pumila* (Pall) Regel needles essential oils from Baikal and Yakut populations. – Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry. 23–9: 19–25.
https://doi.org/10.29296/25877313-2020-09-03 (In Russian)
8. *Vyvodtsev N.V., Dzhumaev M.A., Tagil'tsev Yu.G., Kolesnikova R.D.* 2011. [*Pinus pumila*: distribution, ecology, use]. – Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. 1(20): 115–124.
https://pnu.edu.ru/media/vestnik/articles/509.pdf (In Russian)
9. *Sivtseva S.V., Okhlopkova Zh.M.* 2018. Antibacterial activity and cytotoxicity analysis of wild plants of Yakutia phytomass extracts. – Vestnik of North-Eastern Federal University. 3(65): 24–38.
https://www.s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/dnii/vestnik-svfu/arkhiv/arkhiv-2018/ Вестник%20СВФУ%203%20(65)% 202018.pdf (In Russian)
10. *Lobkovich V.E., Shramenok T.V.* [Toothpaste with *Pinus pumila* oil]. – Patent of invention. RU 2280434 C2, 27.07.2006. Application № 2004124913/15 of 05.08.2004.
https://patenton.ru/patent/RU2280434C2.pdf (In Russian)
11. *Vasil'eva A.G., Chirikova N.K.* 2020. [Biologically active substances of *Pinus pumila* (Pall.) Regel leaves]. – Medical and pharmaceutical journal "Pulse". 22(7): 68–72.
http://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-7-68-72 (In Russian)
12. *Shpatov A.V., Popov S.A., Salnikova O.I., Shmidt E.N., Kang S.W., Kim S.M., Um B.H.* 2013. Lipophilic extracts from needles and defoliated twigs of *Pinus pumila* from two different populations. – Chem. Biodivers. 10(2): 198–208.
https://doi.org/10.1002/cbdv.201200009
13. *Pelymskii G.A., Lapteva N.I.* 2010. [Noble metals in the Udokan ores]. The life of Earth. 32: 88–91.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29865217 (In Russian)
14. *Zinov'ev Yu.I.* 2009. [Geochemical features of the Sakukan fromations and the copper ores of the Udokan]. Mining informational and analytical bulletin. S3: 63–68.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13102615 (In Russian)
15. *Zamana L.V., Usmanov M.T., Borzenko S.V.* 2007. [Hydrochemistry of rivers along the route of the projected Eastern Siberia-Pacific Ocean oil pipeline in the Vitim-Olekma interfluve]. Vodnye resursy. 34(3): 345–355.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9516689 (In Russian)
16. *Makarov V.P., Mikheeva N.Yu., Borzenko S.V.* 2021. Content of chemical elements in soils on the territory of the Udokan copper deposit. – Agrokhimiya. 9: 50–61.
http://doi.org/10.31857/S0002188121090088 (In Russian)
17. *GOST 17.1.3.07-82.* 2001. [Interstate Standard. Nature protection. Hydrosphere. Procedures for quality control of water in reservoirs and stream flows]. Moscow. 10 p.
https://docs.cntd.ru/document/1200012472 (In Russian)
18. *GOST 31861–2012. 2013.* [Interstate standard. Water. General requirements for sampling] Moscow. 32 p.
https://docs.cntd.ru/document/1200097520 (In Russian)
19. *GOST 27384-2002.* 2010. [Interstate standard. Water. Rates of measurement error of characteristics of composition and properties] Moscow. 6 p.
https://docs.cntd.ru/document/1200030884 (In Russian)
20. *GOST 31870-2012.* 2013. [Drinking water. Determination of elements content by atomic spectrometry methods] Moscow. 25 p.
https://docs.cntd.ru/document/1200097409 (In Russian)
21. *[PND F 14.1: 2: 4.138-98.* 2010. Quantitative chemical analysis of waters. Methods for measuring the mass concentrations of potassium, lithium, sodium and strontium in samples of drinking, natural and waste water by the method of flame emission spectrscpoy]. Moscow.18 p.
https://docs.cntd.ru/document/556339180 (In Russian)
22. [*Methods* for determining trace elements in soils, plants, and water]. 1974. Moscow. 284 p. (In Russian)
23. [*Standardized methods* for monitoring of background pollution of the natural environment]. 1986. Moscow. 182 p. (In Russian)
24. *Voitkevich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.I., Prokhorov V.G.* 1990. [Handbook of Geochemistry]. Moscow. 480 p. (In Russian)

25. *Pugachev A.A.* 2011. [Biological cycle components in ecosystems dwarf Siberian pine of the Upper Kolyma river basin]. – Lesovedenie. 1:13–18.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16310983 (In Russian)
26. *Kuz'mina I.Yu.* 2015. Effect of feed additives made of dwarf Siberian pine, lichen and trace elements on the morphological blood parameters of cattle in the Magadan region]. – Sel'skokhozyaistvennye nauki i agropromyshlennyi kompleks na rubezhe vekov. 9: 128–131.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23094380 (In Russian)
27. *Erdyneeva S.A., Shiretorova V.G., Radnaeva L.D.* 2019. [Aspects of heavy metal accumulation by coniferous trees in the Republic of Buryatia]. – Problemy ustoichivogo razvitiya regiona: IX shkola-seminar molodykh uchenykh Rossii, posvyashchennaya 70-letiyu akademika RAN Arnol'da Kirillovicha Tulokhonova, Ulan-Ude. P. 170–175.
https://www.binm.ru/books/2019/02_School_IX.pdf (In Russian)
28. [*Temporary* maximum permissible level (MPL) of some chemical elements and gossypol in feeds for farm animals and feed additives] 1987.
https://fsvps.gov.ru/fsvps/download/attachment/145066/mdu.pdf (In Russian)

**EDN:** YNJQQF
*РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, 2022, том 58, вып. 2, с. 176–178*

## КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ

# ФЛАВОНОИДЫ КОРНЕЙ *LIMONIUM SUFFRUTICOSUM* И *L. CASPIUM* (PLUMBAGINACEAE) ИЗ ФЛОРЫ АЗЕРБАЙДЖАНА

**© 2022 г. И. С. Мовсумов[1], Э. Э. Гараев[2], Г. Хербет[3], Э. А. Гараев[1, *], Т. А. Сулейманов[1]**

[1]*Азербайджанский медицинский университет, Баку, Азербайджан*
[2]*Aix Marseille Univ, Avignon Université, CNRS, IRD, IMBE, FAC PHARM, Marseille, France*
[3]*Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, FSCM, Spectropole, Service 511, Campus Saint-Jérome, Marseille, 13397 France*
**e-mail: eldargar@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.02.2021 г.
После доработки 05.07.2021 г.
Принята к публикации 03.03.2022 г.

Изучен флавоноидный состав корней некоторых представителей рода *Limonium* Mill. (*L. caspium* (Willd.) P. Fourn. и *L. suffruticosum* (L.) Kuntze), произрастающих в Азербайджане. Из корней *L. caspium* и *L. suffruticosum* мирицетин-3'-*O*-сульфат выделен впервые. Из корней *L. suffruticosum* впервые выделены мирицетин, мирицитрин, мирицетин-3'-*O*-сульфат и кверцетин. Результаты выполненного исследования показывают, что корни *L. caspium* и *L. suffruticosum* являются перспективным сырьевым источником флавоноидов.

*Ключевые слова: Limonium caspium*, *Limonium suffruticosum*, мирицетин, мирицитрин, мирицетин-3'-*O*-сульфат, кверцетин, Азербайджан

**DOI:** 10.31857/S0033994622020091

Род *Limonium* Mill. (сем. Plumbaginaceae) включает около 300 видов, распространенных в разных частях света, главным образом в Европейском Среднеземноморье. На Кавказе встречается около 8, а в Азербайджане – 5 видов *Limonium* [1]. Флавоноидный состав некоторых видов был ранее изучен в ряде стран мира [2–6]. Выявление больших природных запасов сырья и недостаточной изученности состава биологически активных компонентов *Limonium caspium* и *L. suffruticosum* стали стимулом для углубленных исследований состава флавоноидов этих видов из флоры Азербайджана.

Цель настоящей работы – исследование флавоноидного состава *Limonium caspium* (Willd.) P. Fourn. и *L. suffruticosum* (L.) Kuntze. на территории Азербайджана.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования явились корни двух видов из рода кермек: *Limonium caspium* и *L. suffruticosum*, имеющих значительные природные запасы в Азербайджане.

Заготовку сырья (корней) *L. suffruticosum* проводили в окрестностях г. Имишли в сентябре 2018 г., *L. caspium* – в окрестностях г. Сиязань в конце октября 2019 г.

Около 2.0 кг измельченных и высушенных корней *L. suffruticosum* экстрагировали этанолом, упаривали до 150–200 мл, смешивали с 200 мл воды, обработали последовательно хлороформом, смесью этилацетат–гексан (в соотношении 1 : 1.2–1.3), этилацетатом и н-бутанолом. Из извлечения смесью гексан–этилацетат получили **вещество 1** (0.4 г), из этилацетатного извлечения – **вещество 2** (0.44 г). Бутанольное извлечение после упаривания обрабатывали горячим ацетоном; после отделения ацетоновой части извлечения и удаления ацетона, с помощью кристаллизации из этанола получили **вещество 3** (0.22 г) и смесь флавоноидов состоящих из двух веществ. Смесь флавоноидов подвергали гидролизу (5% $H_2SO_4$, 4 ч): в качестве продукта гидролиза выделили агликон (**вещество 4**), идентифицированный с кверцетином.

Около 1.0 кг воздушно-сухих и измельченных корней *L. caspium* экстрагировали с 80%-ным этанолом при комнатной температуре трижды, каждый раз применяли новую порцию экстрагента. Экстракты объединяли, упаривали до водного остатка (200 мл), последовательно извлекали хлороформом (600 мл) и смесью этилацетат–гексан (в соотношении 1 : 1.2–1.3) (3 л). Водный слой тщательно экстрагировали этилацетатом (1 л) и оставляли на двое суток. Образованные на стенке

делительной воронке и на границе растворителей желтые кристаллы отделили, промыли водой и этанолом. При необходимости операцию повторяли. Из извлечения смесью этилацетат–гексан получили **вещество 1** (1.63 г), из делительной воронки – **вещество 2** (1.82 г).

ЯМР-спектры веществ регистрировали на приборе марки Bruker 600MHs (Германия), хромато-масс-спектральный анализ – на приборе UHPLC Dionex 3000 с Bruker Impact II (Германия), УФ-спектры – на приборе Agilent Cary 60 UV-Vis Agilent Technologies (США), ИК-спектры – на приборе Agilent Cary 600 FTIR (США), который позволяет использовать образцы в порошкообразном виде, без дополнительной подготовки проб. Температуру плавления определяли на приборе Stuart SMP 20, удельное вращение – Rudolf Research Analytical Autopal. Для бумажной хроматографии использовали бумагу Filtrak FN11, в качестве системы растворителей применяли бутанол–уксусная кислота–вода (4 : 1 : 5). Упаривание проводили на роторном испарителе марки IKA RV 8.

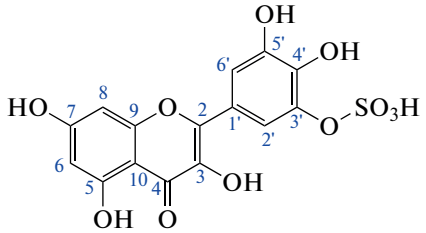
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования компонентного состава корней *L. suffruticosum* L. показали следующее.

**Вещество 1** – $C_{15}H_{10}O_8$, т. пл. 340–352 °C (этанол), УФ-спектр ($\lambda_{max}^{CH_3OH}$, нм): 255, 380. В УФ-свете на хроматограмме имеет желтую флуоресценцию. МСВР: экспер. *m/z* 317.0303 $[M-H]^-$ (вычисл. для $C_{15}H_{10}O_8^-$: 317.0292) и экспер. *m/z* 319.0451 $[M + H]^+$ (вычисл. для $C_{15}H_{10}O_8^+$: 319.0448). ИК-спектр (KBr, ν, см$^{-1}$): 3380–3300, 1640, 1560, 1516, 1377. Согласно данным УФ- и ИК-спектров вещество идентифицировано как мирицетин [7].

**Вещество 2** – т. пл. 352–354 °C (этанол), $[\alpha]_D^{20}$-124° (с 0.5; этанол), УФ-спектры ($\lambda_{max}^{CH_3OH}$, нм): 257, 303, 355. При кислотном гидролизе (5% $H_2SO_4$, 3.5 ч) получили мирицетин (63%) и обнаружили *L*-рамнозу. Вещество 2 идентифицировано как мирицитрин [8].

**Вещество 3** – $C_{15}H_{10}O_{11}S$, МСВР: экспер. *m/z* 396.9871 $[M-H]^-$ (вычисл. для $C_{15}H_{10}O_{11}S^-$: 396.9860) и экспер. *m/z* 399.0004 $[M + H]^+$ (вычисл. для $C_{15}H_{10}O_{11}S^+$: 399.0017). Наилучшая фрагментация МС2 получена в отрицательном режиме при 40 эВ. Полученные фрагменты: *m/z* 151.0073 (100), 179.0026 (60), 137.0280 (54), 317.0354 (45). Фрагмент *m/z* 317.0354 соответствует потере сульфатной группы.




ЯМР $^1$H (600 МГц, DMSO-d6, δ, м.д., J/Гц): 6.19 (1H, д, J = 1.6, H-6), 6.41 (1H, д, J = 1.6, H-8), 7.51 (1H, д, J = 1.6, H-2'), 7.54 (1H, д, J = 1.6, H-6'), 9.42 (1H, с, 3-OH), 12.43 (1H, с, 5-OH), 10.80 (1H, с, 7-OH), 9.28 (1H, с, 4'-OH), 9.14 (1H, с, 5'-OH). ЯМР $^{13}$C (600 МГц, DMSO-d6, δ, м.д.): 146.2 (C-2), 136.1 (C-3), 175.9 (C-4), 160.7 (C-5), 98.3 (C-6), 164.0 (C-7), 93.4 (C-8), 156.1 (C-9), 103.1 (C-10), 121.1 (C-1'), 111.6 (C-2'), 146.6 (C-3'), 140.2 (C-4'), 141.3 (C-5'), 114.6 (C-6').

Данные ЯМР и МС спектров соответствуют мирицетин-3'-*O*-сульфату [6].

**Вещество 4** – $C_{15}H_{10}O_7$, т.пл. 310–312 °C (этанол), УФ-спектры ($\lambda_{max}^{CH_3OH}$, нм): 375, 256. В УФ-свете на хроматограмме имеет желтую флуоресценцию. Вещество 4 идентифицировали как кверцетин.

Флавоноидный состав *L.caspium* Willd: **вещество 1** – идентифицировали как мирицетин, а **вещество 2** – как мирицетин-3'-*O*-сульфат. При идентификации мирицетина и мирицетин-3'-*O*-сульфата использовали достоверные образцы. $R_f$ 0.60 (мирицетин) и 0.30 (мирицетин-3'-*O*-сульфат).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучен флавоноидный состав корней двух видов растений рода *Limonium*: *L. caspium* (Willd.) P. Fourn. и *L. suffruticosum* (L.) Kuntze., произрастающих в Азербайджане. Исследование показало, что корни содержат флавоноиды мирицетин, мирицитрин, мирицетин-3'-*O*-сульфат, после гидролиза – кверцетин (в качестве агликона). Таким образом, сырье является перспективным источником биологически активных веществ. Из корней *L. suffruticosum* – мирицетин, мирицитрин, мирицетин-3'-*O*-сульфат, а из корней *L. caspium* – мирицетин и мирицетин-3'-*O*-сульфат выделены впервые.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прилипко Л.И.* 1957. Флора Азербайджана, сем. Plumbaginaceae, Баку. Т. 7. С. 51–52.
2. *Жусупова Г.Е., Абилькаева С.А.* 2006. Флаваны *Limonium gmelini*. II. – Химия природных соединений. 1: 90.

3. *Lian-ru Zhang, Gho-lin Zou.* 2004. Flavanol of *Limonium bicolor.* – Chem. Nat. Compd. 40(6): 602-603. https://doi.org/10.1007/s10600-005-0050-x
4. *Корулькина Л.М., Шульц Э.Э., Жусупова Г.Е.* 2004. Биологически активные соединения *Limonium gmelini* и *L. popovii.* – Химия природных соединений. 5: 383–393.
5. *Tang X.H., Gao J., Chen J., Xu L.Z., Tang Y.H., Zhao X.N., Michael L.* 2008. Mitochondrial modulation is involved in the hepatoprotection of *Limonium sinense* extract against liver damage in mice. – J. Ethnopharmacol. 120(3): 427–431. https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.09.022
6. *Gadetskaya A.V., Tarawneh A.H., Zhusupova G.E., Gemejiyeva N.G., Cantrell C.L., Cutler S.J., Ross S.A.* 2015. Sulfated phenolic compounds from *Limonium caspium*: Isolation, structural elucidation and biological evaluation. – Fitoterapia. 104: 80–85. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2015.05.017
7. *Мовсумов И.С.* 1996. Флавоноиды корней *Limonium caspium.* – Химия природных соединений. 6: 948.
8. *Мовсумов И.С., Гараев Э.А.* 2005. Флавоноиды *Limonium meyeri.* – Химия природных соединений. 3: 281–282.

# Flavonoids from the Roots of *Limonium suffruticosum* and *L. caspium* (Plumbaginaceae) of Azerbaijan

**I. S. Movsumov[a], E. E. Garayev[b], G. Herbette[c], E. A. Garaev[a], *, T. A. Suleymanov[a]**

[a]*Azerbaijan Medical University, Baku, Azerbaijan*

[b]*Aix Marseille Univ, Avignon Université, CNRS, IRD, IMBE, FAC PHARM, Marseille, France*

[c]*Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, FSCM, Spectropole, Service 511, Campus Saint-Jérome, Marseille, 13397 France*

**e-mail: eldargar@mail.ru*

**Abstract**—In this study, we investigated the flavonoid content of *L. caspium* and *L. suffruticosum*, two *Limonium* Mill. species collected in Azerbaijan. For the first time, myricetin -3'-*O*-sulfate was isolated from the roots of *L. caspium* and *L. suffruticosum*, and myricetin, myricitrin, and quercetin from the roots of *L. suffruticosum*. The results of phytochemical analysis show that *L. caspium* and *L. suffruticosum* roots are rich in flavonoids and a promising source of these compounds.

*Keywords: Limonium caspium*, *Limonium suffruticosum*, myricetin, myricitrin, myricetin -3'-*O*-sulfate, quercetin

## REFERENCES

1. *Prilipko L.I.* 1957. Azerbaijan flora, Plumbaginaceae, Baku. V. 7. p. 51–52.
2. *Zhusupova G.E., Abi'lkaeva S.A.* 2006. Flavonoids from *Limonium gmelinii.* II. – Chemistry of Natural Compounds. 42(1): 112–113. https://doi.org/10.1007/s10600-006-0052-3
3. *Lian-ru Zhang, Gho-lin Zou.* 2004. Flavanol of *Limonium bicolor.* – Chem. Nat. Compd. 40(6): 602–603. https://doi.org/10.1007/s10600-005-0050-x
4. *Korul'kina L.M., Zhusupova G.E., Shoul'tz E.E., Erzhanov K.B.* 2004. Fatty-acid composition of two *Limonium* plant species. – Chem Nat Compd. 40(5): 417–419.
5. *Tang X.H., Gao J., Chen J., Xu L.Z., Tang Y.H., Zhao X.N., Michael L.* 2008. Mitochondrial modulation is involved in the hepatoprotection of *Limonium sinense* extract against liver damage in mice. – J. Ethnopharmacol. 120(3): 427–431. https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.09.022
6. *Gadetskaya A.V., Tarawneh A.H., Zhusupova G.E., Gemejiyeva N.G., Cantrell C.L., Cutler S.J., Ross S.A.* 2015. Sulfated phenolic compounds from *Limonium caspium*: Isolation, structural elucidation and biological evaluation. – Fitoterapia. 104: 80–85. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2015.05.017
7. *Movsumov I.S.* 1996. Flavonoids of the roots of *Limonium caspium.* – Chem. Nat. Compd. 32(6): 922. https://doi.org/10.1007/BF01374035
8. *Movsumov I.S., Garaev E.A.* 2005. Flavonoids from *Limonium meyeri.* – Chem. Nat. Compd. 3: 348. https://doi.org/10.1007/s10600-005-0147-2

**EDN:** DAUIYN
*РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, 2022, том 58, вып. 2, с. 179–196*

## АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ РЕАКЦИЯ СЕЯНЦЕВ *BETULA PUBESCENS* (BETULACEAE) НА ВЫСОКИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ Cu, Ni И Cd В СУБСТРАТЕ В УСЛОВИЯХ ПЕСЧАНОЙ КУЛЬТУРЫ

© 2022 г.
**И. В. Дроздова[1, *], И. Б. Калимова[1], Н. В. Алексеева-Попова[1], А. И. Беляева[1]**
[1]*Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*
**e-mail: idrozdova@binran.ru*

Поступила в редакцию 21.12.2021 г.
После доработки 17.02.2022 г.
Принята к публикации 03.03.2022 г.

Исследовали действие меди, никеля и кадмия (1 и 5 мМ) на накопление биомассы, аккумуляцию физиологически необходимых элементов сеянцами березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и содержание в них основных фотосинтетических пигментов. На основе анализа значений фактора транслокации выявлено активное передвижение никеля и кадмия в надземные органы и существование отчетливого корневого барьера для меди. Сделан вывод об относительно высокой устойчивости сеянцев *B. pubescens* к повышенным концентрациям меди, никеля и кадмия в питательной среде, проявляющейся в ходе эксперимента в отсутствии существенного снижения накопления биомассы опытными растениями по сравнению с контрольными, незначительных изменениях баланса физиологически необходимых макро- и микроэлементов, а также содержания хлорофиллов и каротиноидов. Это делает данный вид перспективным для дальнейших исследований в области фиторемедиации территорий, загрязненных тяжелыми металлами.

*Ключевые слова: Betula pubescens*, медь, никель, кадмий, аккумуляция, токсическое действие, фиторемедиация

**DOI:** 10.31857/S0033994622020042

В Российской Федерации более половины всей площади, находящейся под лиственными древесными породами, занимают представители рода *Betula* [1]. Эта порода дает высококачественное сырье для разных отраслей промышленности: деревообрабатывающей, медицинской, пищевой, а также широко используется для озеленения городской среды. Ее ценность определяется экологической пластичностью, неприхотливостью, способностью расти и возобновляться в различных лесорастительных условиях, в том числе на гарях, а также в условиях хронического атмосферного загрязнения. Хотя большинство древесных видов более чувствительны к действию повышенных концентраций тяжелых металлов, чем травянистые растения, некоторые быстрорастущие виды, такие как *Salix* spp. [2] и *Acer pseudoplatanus* [3], а также виды рода *Betula* [4], выработали в ходе эволюции устойчивость к этим неблагоприятным факторам почвенной среды. Изучение содержания ряда тяжелых металлов в листьях древесных растений, наиболее часто используемых для озеленения городов (тополь, береза, рябина, липа, вяз, ясень) показало, что береза обладает ярко выраженной способностью к аккумуляции тяжелых металлов: Cd, Pb и Ni [5]. В настоящее время считается, что помимо травянистых растений – гипераккумуляторов тяжелых металлов, для целей фиторемедиации интересны и некоторые древесные виды, например, представители родов *Populus* и *Salix* [6], *Quercus suber* L. [7]. Устойчивость разных видов рода *Betula* к повышенным концентрациям тяжелых металлов в окружающей среде не только дает возможность использовать их в качестве биоиндикаторов загрязнения [8, 9], но и свидетельствует о высоком фиторемедиационном потенциале этих видов [10].

В условиях северной тайги на территории России береза пушистая *Betula pubescens* Ehrh. является одним из доминантов растительных сообществ. Присущий данному виду высокий адаптационный потенциал обеспечивает возможность его произрастания на нарушенных участках, непригодных для других древесных пород. Благодаря способности к вегетативному возобновлению, береза пушистая быстро восстанавливается на гарях, поскольку ее подземные органы часто сохраняют жизнеспособность после пожара. Кроме того,

она продуцирует очень большое количество мелких семян, легко распространяемых ветром с прилегающих к гари территорий [11]. Береза пушистая, как листопадная порода, более устойчива к антропогенному загрязнению по сравнению с вечнозелеными хвойными породами. Поэтому она часто выживает даже в зоне локального (импактного) загрязнения, создающегося в непосредственной близости от промышленного производства – источника загрязнения или в зонах хранения отходов предприятий по добыче металлов, хотя при сильном антропогенном загрязнении она имеет небольшую высоту стволов или образует кустарниковую форму [4, 12]. Это подтверждает ранее высказанное предположение, что фенотипическая пластичность – альтернативный механизм устойчивости для долгоживущих древесных растений [3, 13].

Следует отметить, что древесные растения вследствие более продолжительной жизни в большей степени, чем однолетние и двулетние, подвергаются действию стрессовых абиотических факторов. Наряду с этим, естественное семенное возобновление древесных растений на загрязненных тяжелыми металлами почвах часто может быть затруднено в связи с тем, что прорастание семян и формирование корневых систем сеянцев происходит в верхней, наиболее загрязненной части почвенного профиля.

В настоящее время, в среднем около 11% почв территории России имеет высокий уровень загрязнения тяжелыми металлами, а в некоторых регионах этот показатель по ряду элементов превышает предельно допустимые значения [14]. Загрязнение огромных площадей металлами, среди которых значительное место занимают такие элементы, как Cu, Ni и Cd, является результатом антропогенной деятельности, связанной с работой предприятий металлургической, химической промышленности, утилизацией бытовых отходов, переработкой отходов рудных производств, нарушением режима внесения минеральных удобрений и пестицидов. При техногенном загрязнении металлы концентрируются преимущественно в поверхностном слое почвы и находятся в форме оксидов и свободных ионов, последнее повышает их доступность для растений [15]. В связи с этим, они поглощаются растениями в количествах, превышающих их физиологическую потребность, что оказывает токсическое действие. Оно проявляется в нарушении метаболизма, снижении продуктивности и даже гибели растений [16]. Характер и степень ингибирующего действия тяжелых металлов на рост, развитие, фотосинтез, дыхание, водный обмен растений зависят от степени их токсичности, концентрации в окружающей среде и продолжительности воздействия, а также от биологических особенностей вида [17].

В большинстве работ, посвященных исследованию влияния повышенных концентраций тяжелых металлов на основные физиологические процессы, объектами исследования являются травянистые растения. Менее изучены реакции древесных видов на высокое содержание тяжелых металлов в почвах. Работы экспериментального характера, направленные на изучение действия конкретных металлов на важнейшие физиолого-биохимические показатели лиственных древесных растений немногочисленны [18–20]. Это делает крайне актуальным изучение механизмов их устойчивости к высоким концентрациям тяжелых металлов.

Целью настоящей работы является сравнительное исследование особенностей накопления Ni, Cu и Cd сеянцами *B. pubescens* и их влияния на некоторые физиологические показатели растений при внесении повышенных доз металлов в питательную среду.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сбор семян для проведения эксперимента проводили с деревьев *B. pubescens*, произрастающих на территории Ботанического сада им. Петра Великого Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН в г. Санкт-Петербург. Сеянцы выращивали в песчаной культуре в вегетационных сосудах объемом 1 л (по 10 сеянцев на сосуд) в контролируемых условиях при 16-ти часовом фотопериоде и температуре 21 °C с поливом дистиллированной водой, а с момента развертывания семядолей – питательным раствором Арнона в течение двух месяцев. Затем, растения контрольного варианта продолжали поливать питательным раствором, а в опытных вариантах – к нему добавляли растворы сернокислых солей Cu, Ni и Cd, содержащие действующие концентрации этих металлов 1 и 5 мМ. В каждом варианте опыта было по пять вегетационных сосудов.

Образцы для последующего анализа отбирали три раза в ходе развития растений: на 3-и, 7-е, 10-е сутки после внесения металлов. При фиксации корней сеянцев для удаления адсорбированных металлов их отмывали дистиллированной водой, выдерживали 30 мин в растворе детергента (Tris/MES + EGTA, pH 6.0), повторно отмывали дистиллированной водой, затем подсушивали на фильтровальной бумаге. Сеянцы разделяли по органам на корень, стебель и листья, определяли их сырую биомассу на аналитических весах с точ-

ностью до 0.1 мг, а затем фиксировали при 105 °С и высушивали при 70 °С до постоянного веса, после чего определяли сухую биомассу. Данные о различиях сырой и сухой массы сеянцев использовали для расчета содержания воды в органах сеянцев.

Для определения содержания химических элементов сухие образцы растительного материала озоляли в муфельной печи при 450 °С в течение 12 ч. Золу растворяли в смеси кислот 1.5 М HCl и 3.71 М $HNO_3$. Концентрации K, Mg, Fe, Mn, Cu, Ni, Cd в растениях определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре Квант-АФА (“Кортэк”, Россия) с использованием государственных стандартных образцов (ГСО 7190-95, 8092-94, 7325-96, 7272-96). На основании полученных данных был вычислен фактор транслокации (ФТ) – отношение среднего содержания Cu, Ni и Cd в листьях к среднему содержанию соответствующего металла в корнях сеянцев [21].

Образцы для анализа на содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов отбирали на 10-е сутки эксперимента. Количественное определение их содержания было проведено на спектрофотометре Specol 11 (“Carl Zeiss”, Германия) в 100% ацетоновой вытяжке без предварительного разделения с последующим расчетом по формуле Лихтентайлера [22].

Количественные данные были обработаны с помощью однофакторного дисперсионного анализа с использованием программы Statistica 12. Данные представлены как средние значения и их стандартные отклонения. Достоверность различий вариантов опыта по изученным параметрам оценивали по непараметрическому критерию Краскела–Уоллиса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Визуальные наблюдения за состоянием растений показали, что признаки токсичности Cu, Cd и Ni первоначально проявились на 7 сут после внесения металлов. Наиболее отчетливо действие повышенных концентраций Cu и Ni было выражено при концентрации 5 мМ: наблюдался хлороз молодых листьев, а также некротические пятна на листьях отдельных растений. Подобные симптомы в вариантах с Cd стали заметны уже при концентрации 1 мМ. В целом, увеличение экспозиции усиливало отрицательное действие металлов и тем больше, чем выше была их концентрация в субстрате. Следует отметить, что в опытных вариантах наряду с сеянцами, у которых наблюдались фитотоксические симптомы, связанными с повышенным содержанием металлов, были обнаружены явно здоровые сеянцы, практически не отличающиеся от контрольных. Это может свидетельствовать о существенной внутривидовой изменчивости устойчивости *B. pubescens* по отношению к тяжелым металлам, отчетливо проявившейся при повышенных концентрациях металлов в питательной среде. Возможно вследствие этого, несмотря на наблюдающиеся визуальные симптомы токсичности у отдельных растений средние значения сухой массы органов сеянцев во всех экспериментальных вариантах сохранялись на стабильном уровне с незначительными колебаниями (рис. 1), т.е. изученные металлы в испытанных концентрациях не оказывали существенного влияния на накопление сухой массы органами сеянцев *B. pubescens*. Величина биомассы сеянцев в условиях загрязнения среды солями тяжелых металлов является интегральным показателем степени их развития и может выступать в качестве индикатора устойчивости к воздействию металлов [23]. Отсутствие сколько-нибудь значимых различий в накоплении биомассы сеянцами *B. pubescens* в контрольном и опытных вариантах свидетельствует об их высокой устойчивости к изученным металлам. По данным Borgegård, Rydin [24], растения *B. pendula* и *B. pubescens*, не отобранные специально по устойчивости к тяжелым металлам, выживают, когда их высаживают на почвах, сформированных в районе отвалов рудников по добыче Cu, что, по мнению авторов, подразумевает, наличие у этих видов рода *Betula* генетически обусловленной толерантности к металлам.

Исследованные концентрации металлов также не вызывали снижения содержания воды в органах сеянцев в большинстве вариантов опыта. Статистически значимое уменьшение оводненности обнаружено главным образом под влиянием Ni: для корней сеянцев – при концентрациях 1 и 5 мМ, а для остальных изученных органов – при концентрации 5 мМ (рис. 2). Известно, что в присутствии тяжелых металлов оводненность клеток и тканей уменьшается в гораздо меньшей степени, чем остальные показатели водного режима растений, что связано главным образом с увеличением устьичного сопротивления и/или снижением транспирации [16].

В ходе эксперимента изучали характер накопления и распределения по органам Cu, Ni и Cd у растений опытных вариантов по сравнению с контрольным на 3-и, 7-е и 10-е сутки после внесения металлов в питательную среду (рис. 3). Растения контрольного варианта накапливали незначительные количества Cu, особенно в надземной части (3.04–4.27 мг/кг). В литературе отмечается

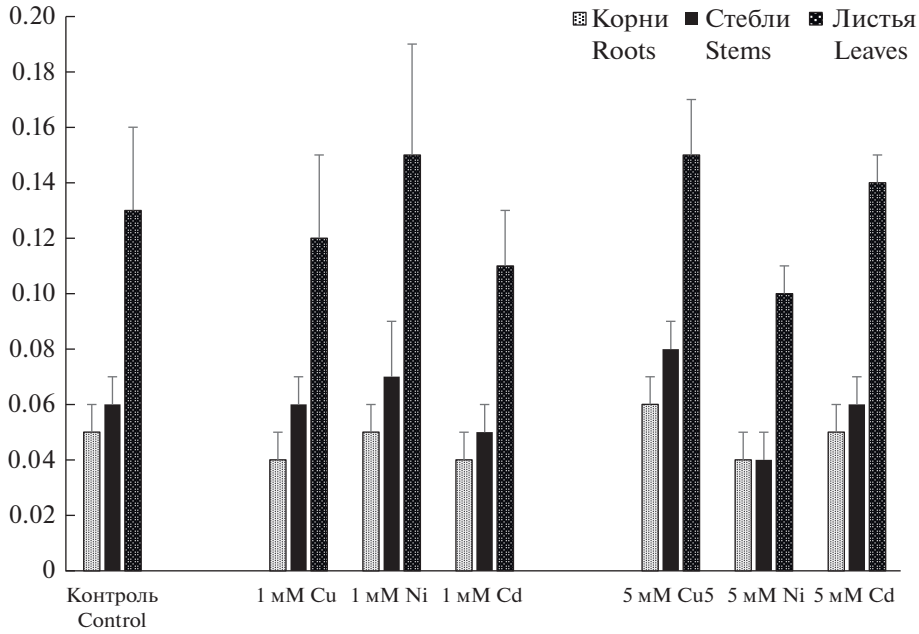



**Рис. 1.** Сухая биомасса органов сеянцев *Betula pubescens* на конец эксперимента.
*По горизонтали* – варианты опыта; *по вертикали* – масса, г/растение.
**Fig. 1.** Dry biomass content in *Betula pubescens* seedling organs at the end of the experiment.
*X-axis* – test variants; *y-axis* – weight, g plant$^{-1}$.

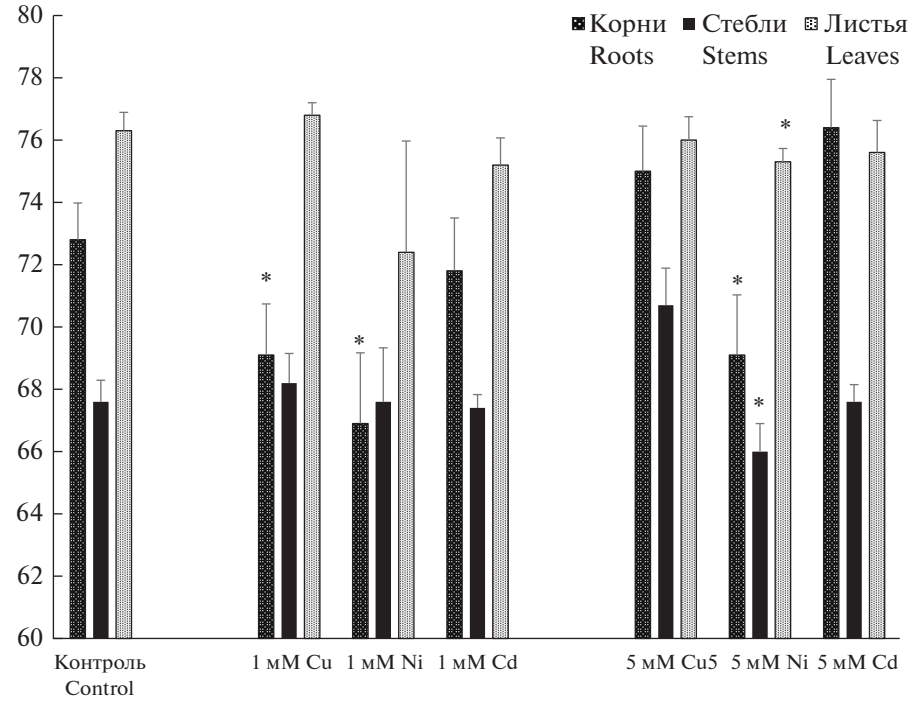



**Рис. 2.** Относительное содержание воды в органах сеянцев *Betula pubescens* на конец эксперимента.
*По горизонтали* – варианты опыта; *по вертикали* – содержание воды, %.
Звездочкой отмечены статистически значимые различия между показателем оводненности в контрольном и опытном вариантах, $n = 5$, $p < 0.05$.
**Fig. 2.** Relative water content in *Betula pubescens* seedling organs at the end of the experiment.
*X-axis* – test variants; *y-axis* – water content, %.
Symbol * indicates the significant differences in water content between control and test variant at $p < 0.05$ according to ANOVA ($n = 5$).

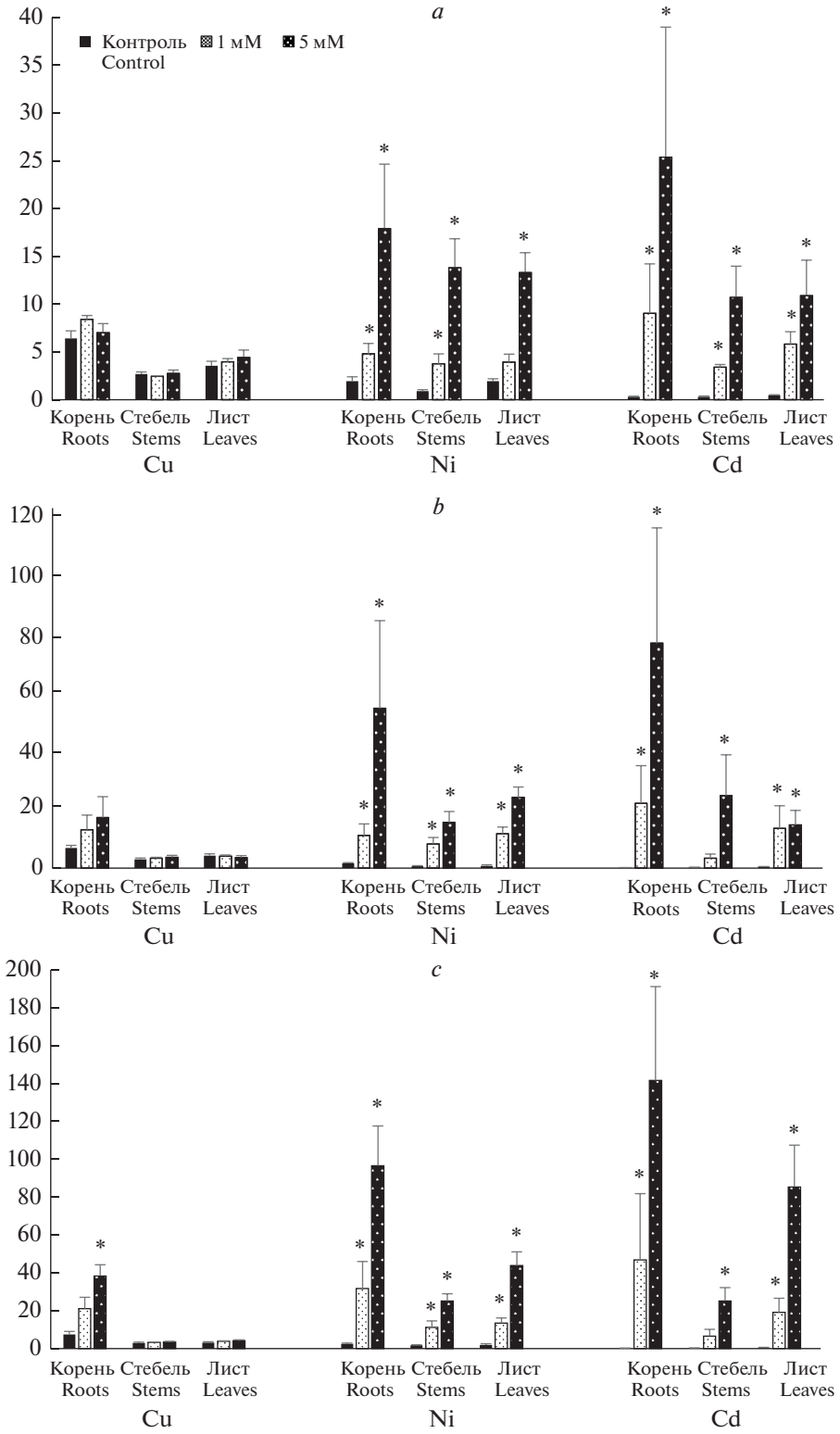



**Рис. 3.** Содержание Cu, Ni и Cd в органах сеянцев *Betula pubescens* на 3-е (*a*), 7-е (*b*) и 10-е (*c*) сутки экспозиции на металлах. *По горизонтали* – органы растений, варианты опыта; *по вертикали* – средняя концентрация металла, мг/кг. Звездочкой отмечены статистически значимые различия между средними значениями концентраций металлов в контрольном и опытных вариантах, $n = 5$, $p < 0.05$.

**Fig. 3.** The content of Cu, Ni, and Cd in *Betula pubescens* seedling organs on the third (*a*), seventh (*b*) and tenth (*c*) days of exposure to metals.
*X-axis* – test variant, plant organs; *y-axis* – mean metal concentration, mg $kg^{-1}$.
Symbol * indicates the significant differences in metal concentrations between control and test variant at $p < 0.05$, according to ANOVA ($n = 5$).

более низкое содержание Cu в листьях *Betula* по сравнению с другими лиственными видами умеренного пояса на Европейской территории [25]. В корнях средние концентрации Cu были более высокими, чем в надземной части, но ≤7.4 мг/кг, т.е. не превышающие содержание Cu в растениях из незагрязненных регионов [26]. Концентрация Ni в растениях контрольного варианта также не превышала фоновых значений: минимальный уровень был отмечен в листьях (0.75 мг/кг), а максимальный (2.45 мг/кг) – в корнях.

Содержание Cd в органах контрольных растений было довольно высокое: в листьях – до 0.47 мг/кг, в корнях – до 0.29 мг/кг. Ранее нами были зафиксированы также достаточно высокие концентрации Cd в листьях *B. pubescens*, произрастающей в ряде ООПТ г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области [27]. Так, содержание Cd в листьях *B. pubescens*, собранных в Юнтоловском заказнике, составило 0.57 мг/кг, что в 3.5 раза превышает уровень элемента в хвое *Pinus sylvestris*, а также в надземной части *Sphagnum angustifolium*.

В опытных вариантах по мере возрастания содержания всех изученных металлов в питательной среде и увеличения срока экспозиции их средняя концентрация наиболее значительно по сравнению с контролем увеличивалась в корнях сеянцев (рис. 3). Однако скорости поглощения исследованных металлов растениями существенно различались. Так, в опытных вариантах с Cu на третьи сутки после внесения металла не наблюдалось статистически значимого увеличения средней концентрации Cu по сравнению с контролем не только в надземных органах, но и в корневой системе сеянцев, что свидетельствует о низкой скорости поглощения металла (рис. 3). Установленные в экспериментах скорости адсорбции меди корневыми системами высших растений сравнимы с наименьшими, полученными для других жизненно важных элементов [28]. В корневой системе на 7-е сутки экспозиции происходило увеличение содержания Cu в 2 раза по сравнению с контролем при концентрации 1мМ и в 2.5 раза – при концентрации 5 мМ, а затем к 10-м суткам отмечен дальнейший рост концентрации металла в корнях: в 3 и 5 раз соответственно.

В листьях и стеблях сеянцев опытных вариантов на протяжении всего эксперимента не было зафиксировано достоверно более высокого по сравнению с контролем накопления Cu (рис. 3). При этом почти не проявился дозовый эффект накопления металла. Сходные характеристики распределения Cu по органам, и прежде всего слабое передвижение ее в листья, были отмечены для растений *B. pubescens* и *B. pendula*, произрастающих в естественных условиях на почвах с высоким уровнем полиметаллического загрязнения [29, 30]. По-видимому, даже в условиях повышенного доступного уровня содержания Cu в среде в надземную часть сеянцев *B. pubescens* поступает лишь небольшая часть металла, поглощенная корнями, что согласуется с литературными данными, полученными в эксперименте с близкородственным видом – *B. pendula* [10]. Анализ концентрации тяжелых металлов в листьях *B. pubescens*, которая произрастала на почвах, загрязненных тяжелыми металлами, показал, что концентрации Zn, Pb и Cd в них превышали таковые в листьях деревьев, растущих на незагрязненных почвах, примерно на один порядок величины, тогда как концентрации Cu были аналогичными [24]. Такой незначительный перенос Cu в надземные органы может объясняться низкой подвижностью Cu за счет связывания ее в ксилемном соке в комплексные соединения и частичной рециркуляцией Cu по флоэме к корням, а также эффективным механизмом связывания металла в труднорастворимые соединения в корнях [31]. Можно полагать, что это один из основных механизмов устойчивости к повышенным дозам Cu в питательной среде.

У растений *B. pubescens* были выявлены резкие различия между изученными металлами по такому важному показателю, как поступление их в надземные органы. Эффективность транспорта элементов из подземных органов в надземные оценивалась по величине ФТ, которая зависит от ряда причин, в том числе от свойств элемента, видовой стратегии растения по отношению к данному элементу, концентрации элемента в питательной среде. Известно, что значение ФТ > 1, даже в случае токсичных элементов, характерно для видов-гипераккумуляторов, а для остальных видов – величина ФТ < 1 [32].

В наших опытах значение ФТ для Cu в контрольном варианте было ниже 1 и существенно не отличалось от такового для опытных вариантов на 3-е сутки после внесения металлов (рис. 4). На 7-е и 10-е сутки ФТ в значительной степени снижался в опытных вариантах при обеих концентрациях Cu. Низкие темпы транслокации Cu в листья свидетельствует о том, что Cu в сеянцах *B. pubescens* малоподвижна, что было установлено и в экспериментах с другими древесными видами, например, рода *Salix* [33] и *Fraxinus angustifolia* [34].

Результаты наших исследований, полученные в этой и предыдущей работах [35], а также данные других авторов [31] ясно показывают, что Ni с гораздо большей скоростью, чем Cu поглощается растениями и гораздо более интенсивно накапли-

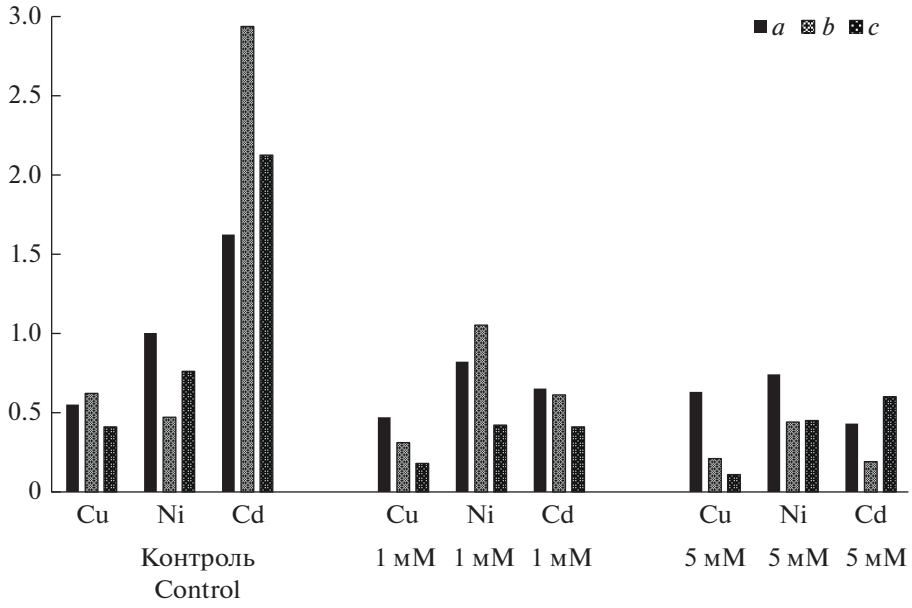



**Рис. 4.** Отношение содержания Cu, Ni и Cd в листьях к их содержанию в корнях у сеянцев *Betula pubescens* (фактор транслокации) на 3-е (*a*), 7-е (*b*) и 10-е (*c*) сутки экспозиции на металлах.
*По горизонтали* – варианты опыта; *по вертикали* – величина фактора транслокации.
**Fig. 4.** The ratio of metal concentration in the leaves to that in the roots (translocation factor) of *Betula pubescens* seedlings on the third (*a*), seventh (*b*) and tenth (*c*) days of exposure to metals.
*X-axis* – test variants; *y-axis* – the value of the translocation factor.

вается в надземных органах. Увеличение содержания Ni в среде выращивания привело к резкому повышению его концентрации во всех органах опытных растений (рис. 3). Например, уже через трое суток после внесения 1 мМ Ni содержание металла в корнях сеянцев повышается в 2.5 раза по сравнению с контролем, а после внесения 5 мМ Ni – в 9 раз, при этом наблюдается значительное увеличение накопления металла со временем: его концентрация в корнях на 7-е сутки эксперимента увеличивается в 7 и 34 раза соответственно. На этом сроке наблюдения статистически значимые различия между концентрациями Ni в корнях и надземных органах проявляются для концентрации 5 мМ, а на 10-е сутки опыта – также и для концентрации 1 мМ. Таким образом, к концу эксперимента становится отчетливо выраженной барьерная функция корней, содержание Ni в корнях в 2 раза превосходит уровень его накопления в листьях и в 2–4 раза в стеблях.

Значения ФТ для Ni на 3-е и 7-е сутки экспозиции были выше, чем для Cd и Cu (рис. 4), что свидетельствует о более высокой скорости транспорта Ni. Известно, что на скорость передвижения отдельных металлов по тканям растения существенное влияние оказывает механизм их транспорта. К настоящему времени установлено, что большая часть Cd присутствует в ксилемном соке в ионной форме, что, по-видимому, является приоритетной причиной его связывания с клеточными стенками [36]. В свою очередь, Ni может перемещаться по ксилеме как в форме свободного иона, так и в комплексе с низкомолекулярными лигандами, что предотвращает его связывание с компонентами клеточных стенок. Кроме того, установлено, что Ni перемещается по растению преимущественно по симпласту, а транспорт симпластических ионов в растении ограничен в незначительной степени [37].

При обеих испытанных концентрациях транслокация Ni в надземные органы снижалась в ходе эксперимента. У растений, выращенных при концентрации Ni 1 мМ, на 3-е и 7-е сутки после внесения металлов значение ФТ металла было выше, чем при концентрации 5 мМ, тогда как спустя 10 суток его значения при обеих концентрациях практически не различались. Ранее было установлено, что величина фактора транслокации для Ni может меняться во времени и в зависимости от концентрации металла в среде [38].

В ходе эксперимента отмечено эффективное поглощение Cd корневой системой и накопление в надземных органах опытных растений уже через трое суток после внесения металла в среду выращивания (рис. 3). Исследования, проведенные на

**Таблица 1.** Содержание фотосинтетических пигментов в листьях сеянцев *Betula pubescens* на конец эксперимента, мг/кг сырой массы
**Table 1.** The photosynthetic pigment contents in the leaves of *Betula pubescens* seedlings at the end of the experiment, mg $kg^{-1}$ of wet weight

| Вариант опыта Test variant | Хлорофилл *a* Chlorophyll *a* | Хлорофилл *b* Chlorophyll *b* | Каротиноиды Carotenoids | *a*/*b* |
|---|---|---|---|---|
| Контроль Control | 2.00 ± 0.06 | 1.05 ± 0.07 | 0.37 ± 0.02 | 1.90 |
| Cu 1 мМ | 1.83 ± 0.09 | 0.96 ± 0.08 | 0.38 ± 0.02 | 1.91 |
| Cu 5 мМ | 1.82 ± 0.05* | 0.96 ± 0.04 | 0.33 ± 0.02 | 1.90 |
| Ni 1 мМ | 2.13 ± 0.07 | 1.19 ± 0.05* | 0.47 ± 0.05* | 1.79 |
| Ni 5 мМ | 1.99 ± 0.09 | 1.03 ± 0.07 | 0.40 ± 0.02 | 1.93 |
| Cd 1 мМ | 1.91 ± 0.08 | 1.03 ± 0.02 | 0.36 ± 0.05 | 1.95 |
| Cd 5 мМ | 1.78 ± 0.05* | 0.89 ± 0.06* | 0.34 ± 0.01 | 2.00 |

Примечания. В таблице представлены средние значения и стандартные отклонения ($m \pm SD$, $n = 5$). Звездочкой отмечены статистически значимые различия между средними значениями концентраций пигментов в контрольном и опытном вариантах, $p < 0.05$.
Notes. All data presented as mean ± *SD* ($n = 5$). Symbol * indicates the significant differences of element pigment between control and test variant at $p < 0.05$ according to ANOVA.

сеянцах древесных растений как в полевых, так и в экспериментальных условиях, указывают на высокую подвижность Cd при его поглощении из почвы и передвижении в надземные органы растений [26, 39]. Максимальное среднее содержание Cd независимо от его концентрации в среде выращивания обнаружено в корнях растений (рис. 3). При этом к концу эксперимента наблюдается значительное накопление металла и в надземных органах. Так, на 10-е сутки эксперимента в варианте опыта 5 мМ содержание Cd в листьях сеянцев в 2 раза превосходило уровень Ni, а Cu – в 20 раз. Следует отметить, что при концентрации Ni 5 мМ его содержание в листьях сеянцев за весь период наблюдения увеличивается достаточно равномерно. При аналогичной же концентрации Cd его содержание в листьях особенно резко – в 5.7 раза возрастает к концу эксперимента. Благодаря этому становится очевидным преимущественное накопление Cd в листьях по сравнению со стеблями. Известно, что более высокие концентрации Cd в листьях, по сравнению с ветвями растений возможны только в случаях сильных аккумуляторов данного металла [40]. В ряде исследований, проведенных как в полевых, так и в экспериментальных условиях выявлена способность некоторых видов рода *Betula* накапливать высокие концентрации Cd в надземных органах без проявления визуальных симптомов токсичности [41–44]. Это может указывать на присущую этим видам высокую устойчивость к Cd.

Значения ФТ для Cd в контрольном варианте было выше 1, что также позволяет сделать вывод об усиленной аккумуляции данного элемента, хотя исходя из абсолютных содержаний Cd в надземных органах *B. pubescens*, мы, конечно, не можем отнести данный вид к гипераккумуляторам Cd в “классическом” понимании этого термина [45].

В опытных вариантах значения ФТ для Cd зависели от дозы металла в питательной среде: при более низкой его концентрации наибольшая величина ФТ отмечена на 3-е сутки после внесения металла (рис. 4). При более высокой концентрации Cd (5 мМ), напротив, наблюдался рост показателя ФТ с увеличением времени экспозиции. Значительное накопление Cd в листьях сеянцев может указывать на интенсивный дальний транспорт иона Cd. Очевидно, что сеянцы *B. pubescens* обладают высокой эффективностью транспортных систем, обеспечивающих быстрый перенос и накопление Cd в надземных органах. Однако следует учитывать, что Cd является одним из самых опасных металлов из-за его высокой подвижности и низкой концентрации, при которой начинает проявляться его токсическое воздействие на растения [46]. Можно предположить, что отмеченные при 5 мМ Cd чрезвычайно высокие его концентрации в листьях сеянцев – 85 мг/кг – могут свидетельствовать о возможном нарушении барьерной функции корня к концу опыта, что при более длительной экспозиции могло бы привести к существенным проявлениям токсических эффектов.

Известно, что стресс, вызванный действием высоких концентраций тяжелых металлов, нарушает метаболизм и оказывает влияние на содержание фотосинтетических пигментов в высших растениях. Главной причиной снижения содержания хлорофиллов при этом является подавле-

ние их синтеза, связанное в первую очередь с непосредственным действием металлов на активность ферментов биосинтеза. Кроме того, нарушение синтеза хлорофилла в присутствии тяжелых металлов может быть вызвано вытеснением ими ионов $Mg^{2+}$ из молекулы хлорофилла. Некоторые металлы, например Cu, в больших концентрациях замедляют связывание молекул хлорофиллов с белками в светособирающих комплексах фотосистем. Известно, что тяжелые металлы способны изменять функционирование мембран хлоропластов и ингибировать работу белков фотосистемы II [16]. По нашим данным, в присутствии высоких концентраций Ni в субстрате не обнаружено снижения содержания фотосинтетических пигментов в листьях сеянцев *B. pubescens* (табл. 1). Напротив, в варианте с внесением Ni в концентрации 1 мМ содержание хлорофилла *b* увеличивалось на 13%, а содержание каротиноидов – на 27%. Содержание хлорофилла *a* в листьях опытных растений при обеих концентрациях Ni было на уровне контрольных растений (табл. 1). Активация синтеза пигментов может быть связана с необходимостью поддержания фотосинтетических процессов на определенном уровне в неблагоприятных условиях произрастания. Высокий уровень поллютантов вызывает торможение синтеза и разрушение фотосинтетических пигментов, но при более низкой интенсивности воздействия может наблюдаться стимуляция их образования. Согласно принципу множественности адаптаций, она реализуется тем эффективнее, чем больше первичных приспособительных реакций имеется у растительного организма [47].

В листьях сеянцев в вариантах с внесением 1 мМ Cu и Cd, уровень хлорофиллов *a* и *b* достоверно не изменился (табл. 1). В то время как при концентрации 5 мМ Cu содержание хлорофилла *a* было снижено на 9%. При этой же концентрации Cd было выявлено уменьшение содержания хлорофилла *a* на 11% и еще более существенное снижение содержания хлорофилла *b* – на 15% от контроля. Изменения в содержании пигментов, в частности, хлорофиллов, часто используются в качестве индикаторной реакции повреждения, происходящего под действием поллютантов. При этом в разных исследованиях отмечается как уменьшение величины соотношения хлорофиллов *a* и *b*, что согласуется с большей устойчивостью к неблагоприятным факторам среды хлорофилла *b* [48], так и увеличение отношения *a*/*b* за счет большей устойчивости хлорофилла *a* [49]. Следует отметить, что, несмотря на количественные изменения в содержании пигментов, проявившиеся под влиянием повышенных концентраций тяжелых металлов, соотношение содержания хлорофиллов в листьях сеянцев меняется незначительно, что указывает на устойчивость к ним фотосинтетического аппарата *B. pubescens*. Об устойчивости фотосинтетической способности другого вида рода *Betula* – *B. populifolia* в широком диапазоне нагрузки тяжелыми металлами: от очень низких до очень высоких их концентраций сообщают Salisbury et al. [50].

В связи с тем, что негативное действие высоких концентраций металлов, не только токсичного Cd, но и эссенциальных Cu и Ni, может вызывать изменения минерального обмена, изучали их влияние на уровень содержания ряда основных физиологически необходимых элементов в растениях *B. pubescens*. В табл. 2 представлены данные по содержанию в сеянцах K, Mg, Fe, Mn и Zn в зависимости от содержания изученных металлов в питательной среде. Следует отметить, что во всех вариантах опыта наблюдается базипетальный характер распределения для Fe и акропетальный – для K, Mg и Mn. Наиболее существенными были различия по уровню содержания Fe, концентрация которого в корнях *B. pubescens* была в 7–34 раза выше, чем в надземных органах.

На фоне обеих испытанных концентраций Cu и Cd и при уровне Ni 5 мМ в питательной среде наблюдалось статистически значимое снижение содержания K в стеблях опытных растений по сравнению с контрольными (табл. 2). Избыточное поступление Ni сопровождалось также уменьшением уровня K в корнях. Установлено, что под влиянием высоких концентраций тяжелых металлов происходит изменение проницаемости мембран и усиление выхода ионов $K^+$ из клеток корня и стебля [46]. Снижение концентрации K после 7 сут воздействия Cu и Cd в корнях и побегах опытных растений по сравнению с контрольными было продемонстрировано в водной культуре *B. pubescens* [51]. Антагонистическое взаимодействие между Cd и K в растениях было показано также в работах Zhang et al. [52] и Rabêlo et al. [53]. Кадмий, не являясь физиологически необходимым элементом, может перемещаться в растении от корней к побегам с помощью переносчиков минеральных питательных веществ, в том числе K, что нарушает его поступление в растение [52].

Высокие концентрации Ni и Cd в питательной среде оказали существенное влияние на поступление и распределение Fe по органам *B. pubescens*. Токсическое действие высоких доз Ni проявилось в существенном снижении концентрации Fe в листьях и стеблях, а Cd – в стеблях растений опытных вариантов по сравнению с контролем (табл. 2). Характерно, что в корнях сеянцев под действием Ni

**Таблица 2.** Содержание макро- и микроэлементов в органах сеянцев *Betula pubescens* на конец эксперимента
**Table 2.** Content of macro- and microelements in the organs of *Betula pubescens* seedlings at the end of the experiment

| Вариант опыта Test variant | K | Mg | Fe | Mn | Zn |
|---|---|---|---|---|---|
| | % | | мг/кг сухой массы mg kg$^{-1}$ dry weight | | |
| Корни Roots | | | | | |
| Контроль Control | 1.29 ± 0.10 | 0.24 ± 0.20 | 316 ± 70 | 21.7 ± 2.3 | 21.3 ± 3.2 |
| Cu 1 мМ | 1.45 ± 0.12 | 0.31 ± 0.03 | 535 ± 105 | 26.7 ± 1.2 | 24.4 ± 6.7 |
| Cu 5 мМ | 1.51 ± 0.05 | 0.28 ± 0.01 | 544 ± 90 | 35.9 ± 9.9 | 16.3 ± 1.1 |
| Ni 1мМ | 0.97 ± 0.10* | 0.27 ± 0.01 | 474 ± 32* | 20.5 ± 2.0 | 27.4 ± 4.0 |
| Ni 5 мМ | 0.87 ± 0.05* | 0.27 ± 0.02 | 766 ± 72* | 24.5 ± 1.1 | 28.3 ± 3.4 |
| Cd 1 мМ | 1.13 ± 0.06 | 0.30 ± 0.02* | 539 ± 61* | 22.4 ± 3.0 | 21.7 ± 3.3 |
| Cd 5 мМ | 1.23 ± 0.07 | 0.31 ± 0.02* | 413 ± 50 | 22.4 ± 1.6 | 23.5 ± 4.2 |
| Стебли Stems | | | | | |
| Контроль Control | 1.06 ± 0.10 | 0.13 ± 0.01 | 46.3 ± 9.5 | 15.6 ± 2.2 | 26.4 ± 3.4 |
| Cu 1 мМ | 0.69 ± 0.02* | 0.15 ± 0.01 | 32.9 ± 5.6 | 9.94 ± 1.58 | 19.3 ± 3.1 |
| Cu 5 мМ | 0.73 ± 0.09* | 0.17 ± 0.01* | 40.4 ± 8.2 | 9.37 ± 1.21* | 20.7 ± 3.7 |
| Ni 1 мМ | 1.02 ± 0.07 | 0.18 ± 0.03 | 34.0 ± 2.7 | 8.64 ± 0.67* | 15.0 ± 2.3 |
| Ni 5 мМ | 0.70 ± 0.10* | 0.10 ± 0.01 | 22.3 ± 2.5* | 6.34 ± 0.22* | 15.7 ± 2.0 |
| Cd 1 мМ | 0.57 ± 0.05* | 0.13 ± 0.02 | 19.9 ± 2.9* | 6.51 ± 0.25* | 16.0 ± 1.2 |
| Cd 5 мМ | 0.67 ± 0.03* | 0.13 ± 0.02 | 18.4 ± 6.9* | 11.7 ± 0.9 | 21.2 ± 4.5 |
| Листья Leaves | | | | | |
| Контроль Control | 2.09 ± 0.10 | 1.46 ± 0.10 | 46.3 ± 5.6 | 91.7 ± 31.2 | 27.1 ± 3.2 |
| Cu 1 мМ | 2.07 ± 0.07 | 1.46 ± 0.07 | 53.6 ± 7.4 | 82.8 ± 21.8 | 28.2 ± 3.0 |
| Cu 5 мМ | 1.91 ± 0.03 | 1.37 ± 0.11 | 63.7 ±9.3 | 48.2 ± 6.5 | 27.9 ± 5.3 |
| Ni 1 мМ | 2.27 ± 0.07 | 1.46 ± 0.12 | 32.8 ± 5.5 | 50.3 ± 5.1 | 26.3 ± 3.4 |
| Ni 5 мМ | 2.16 ± 0.20 | 1.37 ± 0.11 | 25.6 ± 4.1* | 41.0 ± 3.2 | 29.9 ± 3.6 |
| Cd 1 мМ | 1.90 ± 0.05 | 1.44 ± 0.05 | 51.6 ± 8.6 | 35.9 ± 1.0 | 27.1 ± 2.8 |
| Cd 5 мМ | 2.19 ± 0.08 | 1.35 ± 0.08 | 47.9 ± 3.6 | 53.7 ± 12.4 | 24.8 ± 2.5 |

Примечания. В таблице представлены средние значения со стандартными отклонениями ($m \pm SD$, $n = 5$). Звездочкой отмечены статистически значимые различия между средними значениями концентраций элементов в контрольном и опытном вариантах, $p < 0.05$.
Notes. All data presented as mean ± *SD* ($n = 5$). Symbol * indicates the significant differences of element concentrations between control and test variant at $p < 0.05$ according to ANOVA.

и Cd содержание Fe, напротив, повышалось (табл. 2). Антагонистический характер его взаимодействия с Ni и Cd проявляется в данном случае в нарушении передвижения Fe в надземные органы. Установлено, что основной транспортной формой Fe в растении является $Fe^{2+}$. В условиях индуцированного избытком тяжелых металлов окислительного стресса может наблюдаться ингибирование восстановления $Fe^{3+}$ в апопласте клеток корня, что, в свою очередь, приводит к подавлению дальнего транспорта Fe [52, 54, 55]. Дефицит Fe сопровождался развитием визуальных признаков хлороза, наблюдаемого нами на листьях некоторых менее устойчивых особей *B. pubescens*.

Другим симптомом отрицательного влияния испытанных концентраций тяжелых металлов является статистически значимое практически во всех вариантах опыта снижение содержания Mn в стеблях сеянцев и тенденция к снижению в листьях *B. pubescens* (табл. 2). Подавление транслокации Mn под действием Cu, Ni и Cd свидетельствует об антагонизме между этими элементами и было отмечено в других исследованиях в природных и экспериментальных условиях [56, 57]. Не выявлено существенного влияния Cu, Ni и Cd на уровень накопления Mg и Zn в сеянцах *B. pubescens*. Таким образом, токсичность изученных тяжелых металлов проявилась в нарушении поглощения и транслокации сеянцами *B. pubescens* таких физиологически необходимых элементов питания, как K, Fe и Mn.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе выявлены особенности аккумуляции Cu, Ni и Cd и их влияние на накопление биомассы, минеральный состав и содержание фотосинтетических пигментов у сеянцев *Betula pubescens* в условиях эксперимента. Показано, что при выращивании сеянцев *B. pubescens* в песчаной культуре на фоне повышенных концентраций (1 и 5 мМ) этих металлов отсутствовали значимые различия в аккумуляции биомассы надземных органов и корней у растений опытных и контрольного вариантов. Избыток тяжелых металлов в среде выращивания не оказывал также существенного влияния на оводненность органов сеянцев. Накопление всех исследованных металлов с увеличением их концентрации в питательной среде наиболее значительно возрастало в корневой системе сеянцев. В надземной части содержание металлов увеличивалось по сравнению с контролем в меньшей степени, особенно Cu. На основе анализа величин фактора транслокации выявлено активное передвижение Ni и Cd в надземные органы и существование отчетливого корневого барьера для Cu. Установлена временная специфика аккумуляции металлов в органах сеянцев. При более длительной экспозиции отмечено уменьшение скорости транслокации элементов в надземные органы, за исключением варианта с концентраций Cd 5 мМ.

На фоне обеих изученных концентраций Cu и Cd наблюдалось небольшое снижение содержания K в стеблях сеянцев, а в варианте с Ni – в корнях сеянцев. Практически во всех случаях отмечено более низкое по сравнению с контролем содержание Mn в стеблях сеянцев *B. pubescens* под действием всех изученных металлов. В надземных органах растений опытных вариантов установлено уменьшение содержания Fe, и, напротив, увеличение его концентрации в корнях. Антагонистический характер взаимодействия Fe с Ni и Cd проявился в данном случае в нарушении его передвижения в надземные органы.

Влияние изученных концентраций тяжелых металлов на содержание фотосинтетических пигментов зависело от дозы вносимого элемента. При концентрации 1мМ Cu или Cd уровень хлорофиллов *a* и *b* не изменился, а при аналогичной концентрации Ni наблюдалось увеличение содержания хлорофилла *b* и каротиноидов. Под влиянием концентраций Cu и Cd 5 мМ отмечено снижение содержания хлорофиллов *a* и *b* на 9–15% по сравнению с контролем. Однако, несмотря на количественные изменения в содержании пигментов, соотношение хлорофилл *a*/хлорофилл *b* сохранялось на стабильном уровне с небольшими колебаниями.

Полученные нами результаты позволяют сделать вывод об относительно высокой устойчивости сеянцев *B. pubescens* к действию повышенных концентраций Cu, Ni и Cd. Для *B. pubescens* характерна способность к транслокации достаточно больших концентраций Ni и Cd в листья, а также возможность поддерживать существенно не отличающуюся от контроля биомассу во время всего эксперимента, даже при избытке такого токсичного металла, как Cd. В сочетании с высокой семенной продуктивностью это делает данный вид перспективным для использования в области фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 121032500047-1) Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН.

Авторы выражают благодарность ведущему агроному Ботанического сада им. Петра Великого С.В. Шевчуку за помощь в сборе семян *Betula pubesces*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Дроздов С.Н., Холопцева Е.С., Сазонова Т.А.* 2014. Свето-температурная характеристика сеянцев березы пушистой *Betula pubescens* (Betulaceae). – Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1(337): 27–36. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21227828
2. *Kahle H.* 1993. Response of roots of trees to heavy metals. – Environ. Exp. Bot. 33(1): 99–119. https://doi.org/10.1016/0098-8472(93)90059-O
3. *Turner A.P., Dickinson N.M.* 1993. Survival of *Acer pseudoplantanus* L. (sycamore) seedlings on metalliferous soils. – New Phytol. 123(3): 509–521. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03763.x
4. *Denny H.J., Wilkins D.A.* 1987. Zinc tolerance in *Betula* spp. I. Effects of external concentration of zinc on growth and uptake. – New Phytol. 106(3): 517–524. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1987.tb00156.x
5. *Кузнецова Т.Ю.* 2009. Влияние тяжелых металлов на некоторые физиолого-биохимические показатели растений рода *Betula* L.: Автореф. дис. ... к-та биол. наук. Петрозаводск. 24 с.
6. *Capuana M.* 2011. Heavy metals and woody plants - biotechnologies for phytoremediation. – iForest – Biogeosciences and Forestry. 4(1): 7–15. https://doi.org/10.3832/ifor0555-004
7. *Gogorcena Y., Larbi A., Andaluz S., Carpena R.O., Abadía A., Abadía J.* 2011. Effects of cadmium on cork oak (*Quercus suber* L.) plants grown in hydroponics. – Tree Physiology. 31(12): 1401–1412. https://doi.org/10.1093/treephys/tpr114
8. *Петункина Л.О., Сарсацкая А.С.* 2015. Береза повислая как индикатор качества городской среды. – Вестник Кемеровского государственного университета. 4-3(64): 68–71. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24986475
9. *Samecka-Cymerman A., Kolon K., Kempers A.* 2009. Short shoots of *Betula pendula* Roth. as bioindicators of urban environmental pollution in Wrocław (Poland). – Trees. 23(5): 923–929. https://doi.org/10.1007/s00468-009-0334-z
10. *Rosselli W., Keller C., Boschi K.* 2003. Phytoextraction capacity of trees growing on a metal contaminated soil. – Plant and Soil. 256(2): 265–272. https://doi.org/10.1023/A:1026100707797
11. *Горшков В.В., Ставрова Н.И., Катютин П.Н.* 2005. Структура популяций *Betula pubescens* (Betulaceae) в северотаежных лесных сообществах с различной давностью нарушения. – Растительные ресурсы. 41(2): 1–16. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9150183
12. *Зверев В.Е.* 2009. Смертность и возобновление березы извилистой в зоне воздействия медно-никелевого комбината в период значительного сокращения выбросов: Результаты 15-летнего мониторинга. – Экология. 4: 271–277. https://doi.org/10.31857/S0367059721040041
13. *Thompson J.D.* 1991. Phenotypic plasticity as a component of evolutionary change. – Trends Ecol. Evol. 6(8): 246–249. https://doi.org/10.1016/0169-5347(91)90070-E
14. *Мотузова Г.В.* 2000. Устойчивость почв к химическому воздействию. М. 57 с.
15. *Ильин В.Б.* 2012. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск. 218 с.
16. *Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В.* 2014. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск. 194 с. http://elibrary.krc.karelia.ru/311/1/titov_a.f._kaznina_n.m._talanova_v.v._tjazhelye_metally_i_rastenija.pdf
17. *Казнина Н.М., Титов А.Ф., Топчиева Л.В., Лайдинен Г.Ф., Батова Ю.В.* 2012. Влияние возрастных различий на реакцию растений ячменя на действие кадмия. – Физиология растений. 59(1): 74–79. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17312890
18. *Utriainen M.A., Kärenlampi L.V., Kärenlampi S.O., Schat H.* 1997. Differential tolerance to copper and zinc of micropropagated birches tested in hydroponics. – New Phytol. 137(3): 543–549. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00840.x
19. *Österås A.H., Ekvall L., Greger M.* 2000. Sensitivity to, and accumulation of cadmium in *Betula pendula*, *Picea abies*, and *Pinus sylvestris* seedlings from different regions in Sweden. – Can. J. Bot. 78(11): 1440–1449. https://doi.org/10.1139/b00-119
20. *Kopponen P., Utriainen M., Lukkari K., Suntioinen S., Kärenlampi L., Kärenlampi S.* 2001. Clonal differences in copper and zinc tolerance of birch in metal-supplemented soil. – Environmental Pollution. 112(1): 89–97. https://doi.org/10.1016/s0269-7491(00)00096-8
21. *Pandey V.C., Singh K., Singh R.P., Singh B.* 2012. Naturally growing *Saccharum munja* L. on the fly ash lagoons: A potential ecological engineer for the revegetation and stabilization. – Ecol. Eng. 40: 95–99. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.019

22. *Lichtenthaler H.K.* 1987. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. – Methods in Enzymology. 148: 350–382.
https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1

23. *Иванов Ю.В., Савочкин Ю.В., Кузнецов Вл.В.* 2011. Сосна обыкновенная как модельный объект для изучения механизмов адаптации хвойных к действию тяжелых металлов. 1. Изменение морфометрических и физиологических параметров при развитии сеянцев сосны в условиях хронического действия цинка. – Физиология растений. 58(5): 728–736. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16766030

24. *Borgegård S.-O., Rydin H.* 1989. Biomass, root penetration and heavy metal uptake in birch, in a soil cover over copper tailings. – J. Appl. Ecol. 26(2): 585–595.
https://doi.org/10.2307/2404084

25. *Hagen-Thorn A., Stjernquist I.* 2005. Micronutrient levels in some temperate European tree species: a comparative field study. – Trees. 19(5): 572–579.
https://doi.org/10.1007/s00468-005-0416-5

26. *Kabata-Pendias A., Pendias H.* 2001. Trace Elements in Soils and Plants. 3rd Edition, CRC Press Inc., Boca Raton, Fl. 403 p.
https://doi.org/10.1201/9781420039900

27. *Дроздова И.В., Алексеева-Попова Н.В., Беляева А.И.* 2015. Уровень содержания тяжёлых металлов в системе почва-растение некоторых особо охраняемых природных территорий г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области. – В сб.: Экологические проблемы промышленных городов: Тез. докл. 7-й Всероссийской научно-практической конф. с международным участием. Саратов. С. 251–254.

28. *Graham R.* 1981. Absorption of Copper by Plant Roots. – In: Copper in Soils and Plants. Sydney. P. 141–163.

29. *Kozlov M., Haukioja E., Bakhtiarov A., Stroganov D., Zimina S.* 2000. Root versus canopy uptake of heavy metals by birch in an industrially polluted area: Contrasting behaviour of nickel and copper. – Environ. Polluti. 107(3): 413–420.
https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00159-1

30. *Maurice C., Lagerkvist A.* 2000. Using *Betula pendula* and *Telephora caryophyllea* for soil pollution assessment. – Soil Sediment Contam. 9(1): 31–50.
https://doi.org/10.1080/10588330091134185

31. *Liao M., Hedley M., Woolley D., Brooks R., Nichols M.* 2000. Copper uptake and translocation in chicory (*Cichorium intybus* L. cv. Grasslands Puna) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Rondy) plants grown in NFT system. I. Copper uptake and distribution in plants. – Plant and Soil. 221(2): 135–142.
https://doi.org/10.1023/A:1004843505053

32. *Jing Y., Cui H., Li T., Zhao Z.* 2014. Heavy metal accumulation characteristics of Nepalese alder (*Alnus nepalensis*) growing in a lead-zinc spoil heap, Yunnan, southwestern China. – iForest – Biogeosciences and Forestry. 7(4): 204–208.
https://doi.org/10.3832/ifor1082-007

33. *Kuzovkina Y., Knee M., Quigley M.* 2010. Cadmium and copper uptake and translocation in five willow (*Salix* L.) species. – Int. J. Phytoremediation. 6(3): 269–287.
https://doi.org/10.1080/16226510490496726

34. *Arduini I., Godbold D.L., Onnis A.* 1996. Cadmium and copper uptake and distribution in Mediterranean tree seedlings. – Physiol. Plant. 97(1): 111–117.
https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1996.tb00486.x

35. *Дроздова И.В., Алексеева-Попова Н.В., Беляева А.И., Калимова И.Б.* 2014. Влияние меди, никеля и кадмия на рост и некоторые физиологические параметры сеянцев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* (сем. Pinaceae). – Растительные ресурсы. 50(4): 554–556. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22260671

36. *Rabêlo F., Gaziola S., Rossi M., Silveira N., Wójcik M., Bajguz A., Piotrowska-Niczyporuk A., Lavres J., Linhares F., Azevedo R., Vangronsveld J., Alleoni L.* 2021. Unraveling the mechanisms controlling Cd accumulation and Cd-tolerance in *Brachiaria decumbens* and *Panicum maximum* under summer and winter weather conditions. – Physiol. Plant. 173(1): 20–44.
https://doi.org/10.1111/ppl.13160

37. *Серегин И.В., Кожевникова А.Д.* 2008. Роль тканей корня и побега в транспорте и накоплении кадмия, свинца, никеля и стронция. – Физиология растений. 55(1): 5–26. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9590996

38. *Кожевникова А.Д., Серегин А.В., Схат Х.* 2020. Накопление никеля исключателем *Thlaspi arvense* и гиперакку-мулятором *Noccaea caerulesces* при кратковременной и длительной инкубации. – Физиология растений. 67(2): 167–176.
https://doi.org/10.31857/S0015330320020086

39. *Gussarsson M.* 1994. Cadmium-induced alterations in nutrient composition and growth of *Betula pendula* seedlings: the significance of fine root as a primary target for cadmium toxicity. – J. Plant Nutrition. 17(12): 2151–2163.
https://doi.org/10.1080/01904169409364871

40. *Brekken A., Steinnes E.* 2004. Seasonal concentrations of cadmium and zinc in native pasture plants: consequences for grazing animals. – Science of the Total Environment. 326 (1–3): 181–195.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.023

41. *Мялик А.Н., Дашкевич М.М., Галуц О.А.* 2020. Микроэлементный состав растительного сырья берёзы бородавчатой в условиях юго-запада Беларуси. – В сб.: От растения до лекарственного препарата: Тез. докл. международной науч. конф. М. С. 260–269. http://hbc.bas-net.by/hbcinfo/books/Mialik2020-2.pdf

42. *Кузнецова Т.Ю., Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф.* 2015. Аккумуляция тяжелых металлов в различных органах и тканях березы в зависимости от условий произрастания. – Труды Карельского научного центра РАН. 1: 86–94.
https://doi.org/10.17076/eco27

43. *Науменко О.А., Соколова О.Я., Бибарцева Е.В.* 2015. Характеристика видовых особенностей кадмий связывающей способности древесных растений города Оренбурга. – Вестник Оренбургского государственного университета. 10 (185): 225–228. http://vestnik.osu.ru/2015_10/51.pdf

44. *Fernández R., Bertrand A., Casares A., García R., González A., Tamés R.S.* 2008. Cadmium accumulation and its effect on the in vitro growth of woody fleabane and mycorrhized white birch. – Environ. Pollut. 152(3): 522–529.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.07.011

45. *Reeves R., Baker A., Jaffré T., Erskine P., Echevarria G., van der Ent A.* 2017. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. – New Phytol. 218(2): 407–411.
https://doi.org/10.1111/nph.14907

46. *Barceló J., Poschenrieder C.* 1990. Plant water relations as affected by heavy metal stress: A review. – J. Plant Nutr. 13(1): 1–37.
https://doi.org/10.1080/01904169009364057

47. *Усманов И.Ю., Рахманкулова З.Ф., Кулагин А.Ю.* 2001. Экологическая физиология растений. М. 223 с.

48. *Öncel I., Keleş Y., Üstün A.* 2000. Interactive effects of temperature and heavy metal stress on the growth and some biochemical compounds in wheat seedlings. – Environ. Pollut. 107(3): 315–320.
https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00177-3

49. *Zengin F., Munzuroglu O.* 2005. Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, proline and some antioxidant chemicals in bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) seedlings. – Acta biologica Cracoviensia. Series botanica. 47(2): 157–164.
https://abcbot.pl/pdf/47_2/157-164.pdf

50. *Salisbury A., Gallagher F., Caplan J., Grabosky J.* 2018. Maintenance of photosynthesis by *Betula populifolia* in metal contaminated soils. – Sci. Total Environ. 625: 1615–1627.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.279

51. *Gussarsson M., Jensen P.* 1992. Effects of copper and cadmium on uptake and leakage of $K^+$ in birch (*Betula pendula*) roots. – Tree Physiol. 11(3): 305–313.
https://doi.org/10.1093/treephys/11.3.305

52. *Zhang X., Gao B., Xia H.* 2014. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of bana grass and vetiver grass. – Ecotoxicol. Environ. Saf. 106: 102–108.
https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.04.025

53. *Rabêlo F.H.S., Lux A., Rossi M.L., Martinelli A.P., Cuypers A., Lavres J.* 2018. Adequate S supply reduces the damage of high Cd exposure in roots and increases N, S and Mn uptake by Massai grass grown in hydroponics. – Environ. Exp. Botany. 148(4): 35–46.
https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.01.005

54. *Черемисина А.И., Шевякова Н.И., Кузнецов Вл.В.* 2012. Динамика аккумуляции никеля и возможные причины дефицита железа в листьях гибридной формы амаранта. – Вестник РУДН, серия Агрономия и животноводство. 3: 21–30. http://agrojournal.rudn.ru/agronomy/article/view/1718

55. *Sebastian A., Prasad M.* 2016. Iron plaque decreases cadmium accumulation in *Oryza sativa* L. and serves as a source of iron. – Plant Biol. 18(6): 1008–1015.
https://doi.org/10.1111/plb.12484

56. *Burton K., Morgan E., Roig A.* 1986. Interactive effects of cadmium, copper and nickel on the growth of sitka spruce and studies of metal uptake from nutrient solutions. – New Phytol. 103(3): 549–557.
https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1986.tb02892.x

57. *Wang M., Zou J., Duan X., Jiang W., Liu D.* 2007. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.). – Bioresour. Technol. 98(1): 82–88.
https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.028

# Comparative Response to High Cu, Ni, and Cd Concentrations of *Betula pubescens* Seedlings (Betulaceae) in Sand Culture

**I. V. Drozdova[a], *, I. B. Kalimova[a], N. V. Alekseeva-Popova[a], A. I. Belyaeva[a]**

[a]*Komarov Botanical Institute RAS, St. Petersburg, Russia*

**e-mail: idrozdova@binran.ru*

**Abstract**—The effect of two levels of Cu, Ni, and Cd was analysed in an experiment with downy birch (*Betula pubescens* Ehrh) seedlings. We examined the capacity to accumulate and tolerate toxic levels of these metals and their effect on biomass production, nutrient composition, chlorophyll and carotenoids content. Seedlings were treated for ten days in sand culture with 0 (control), 1 mM and 5 mM Cu, Ni, and Cd. Heavy metals, especially copper, in roots of seedlings showed higher concentrations with respect to leaves and stems. At the same time, relatively high concentrations of nickel (43.6 ± 7.29) and cadmium (85 ± 22) in the leaves of seedlings were noted. Results on metal translocation factor (TF) values showed an easy transportation of nickel and cadmium into the aerial organs and the existence of a pronounced root barrier for copper. There was no significant decrease in the accumulation of biomass by the experimental plants in comparison with the control ones during the experiment, and moderate alterations were occurred in the nutrient balance and photosynthetic pigment contents. These data indicate a relatively high tolerance of *B. pubescens* seedlings to high concentrations of copper, nickel, and cadmium in the grown medium. A possible use of this species for phytoremediation of metal-polluted substrates appears very promising and may be confirmed in further experiments.

*Keywords: Betula pubescens*, copper, nickel, cadmium, accumulation, toxic effect, phytoremediation

## ACKNOWLEDGEMENTS

The present study was carried out within the framework of the institutional research project 121032500047-1 of the Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Science.

We are grateful to S.V. Shevchuk for his assistance in collecting *Betula pubesces* seeds.

## REFERENCES

1. *Drozdov S.N., Kholoptseva E.S., Sazonova T.A.* 2014. Light-temperature characteristics of *Betula pubescens* (Betulaceae) seedlings. – Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 1(337): 27–36. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21227828 (In Russian)
2. *Kahle H.* 1993. Response of roots of trees to heavy metals. – Environ. Exp. Bot. 33(1): 99–119. https://doi.org/10.1016/0098-8472(93)90059-O
3. *Turner A.P., Dickinson N.M.* 1993. Survival of *Acer pseudoplantanus* L. (sycamore) seedlings on metalliferous soils. – New Phytol. 123(3): 509–521. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03763.x
4. *Denny H.J., Wilkins D.A.* 1987. Zinc tolerance in *Betula* spp. I. Effects of external concentration of zinc on growth and uptake. – New Phytol. 106(3): 517–524. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1987.tb00156.x
5. *Kuznetsova T.Yu.* 2009. [The effect of heavy metals on some physiological and biochemical parameters of genus Betula L. plants: Abstr. ... Dis. Cand. (Biology) Sci.]. Petrozavodsk. 24 p. (In Russian)
6. *Capuana M.* 2011. Heavy metals and woody plants – biotechnologies for phytoremediation. – iForest – Biogeosciences and Forestry. 4(1): 7–15. https://doi.org/10.3832/ifor0555-004
7. *Gogorcena Y., Larbi A., Andaluz S., Carpena R.O., Abadía A., Abadía J.* 2011. Effects of cadmium on cork oak (*Quercus suber* L.) plants grown in hydroponics. – Tree Physiology. 31(12): 1401–1412. https://doi.org/10.1093/treephys/tpr114
8. *Petunkina L.O., Sarsackaya A.S.* 2015. Phytoindication state of *Betula pendula* in the urban environment of Kemerovo. – Bulletin of Kemerovo State University. 4–3(64): 68–71. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24986475 (In Russian)
9. *Samecka-Cymerman A., Kolon K., Kempers A.* 2009. Short shoots of *Betula pendula* Roth. as bioindicators of urban environmental pollution in Wrocław (Poland). – Trees. 23(5): 923–929. http://doi.org/10.1007/s00468-009-0334-z

10. *Rosselli W., Keller C., Boschi K.* 2003. Phytoextraction capacity of trees growing on a metal contaminated soil. – Plant and Soil. 256(2): 265–272.
https://doi.org/10.1023/A:1026100707797

11. *Gorshkov V.V., Stavrova N.I., Katyutin P.N.* 2005. [Structure of *Betula pubescens* (Betulaceae) population in forest communities of different age of disturbance in northern taiga]. – Rastitel'nye resursy. 41(2): 1–16.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9150183

12. *Zverev V.E.* 2009. Mortality and recruitment of mountain birch (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*) in the impact zone of a copper-nickel smelter in the period of significant reduction of emissions: The results of 15-year monitoring. – Russ. J. Ecol. 40(4): 254–260.
https://doi.org/10.1134/S1067413609040055

13. *Thompson J.D.* 1991. Phenotypic plasticity as a component of evolutionary change. – Trends Ecol. Evol. 6(8): 246–249.
https://doi.org/10.1016/0169-5347(91)90070-E

14. *Motuzova G.V.* 2000. [Chemical resistance of soils]. Moscow. 57 p. (In Russian)

15. *Il'in V.B.* 2012. [Heavy metals and non-metals in the soil–plant system]. Novosibirsk. 218 p. (In Russian)

16. *Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V.* 2014. [Heavy metals and plants]. Petrozavodsk. 194 p.
http://elibrary.krc.karelia.ru/311/1/titov_a.f._kaznina_n.m._talanova_v.v._tjazhelye_metally_i_rastenija.pdf (In Russian)

17. *Kaznina N.M., Titov A.F., Topchieva L.V., Laidinen G.F., Batova Y.V.* 2012. Barley plant response to cadmium action as dependent on plant age. – Russ. J. Plant Physiol. 59(1): 65–70.
https://doi.org/10.1134/S1021443712010104

18. *Utriainen M.A., Kärenlampi L.V., Kärenlampi S.O., Schat H.* 1997. Differential tolerance to copper and zinc of micropropagated birches tested in hydroponics. – New Phytol. 137(3): 543–549.
https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00840.x

19. *Österås A.H., Ekvall L., Greger M.* 2000. Sensitivity to, and accumulation of cadmium in *Betula pendula*, *Picea abies*, and *Pinus sylvestris* seedlings from different regions in Sweden. – Can. J. Bot. 78(11): 1440–1449.
https://doi.org/10.1139/b00-119

20. *Kopponen P., Utriainen M., Lukkari K., Suntioinen S., Kärenlampi L., Kärenlampi S.* 2001. Clonal differences in copper and zinc tolerance of birch in metal-supplemented soil. – Environmental Pollution. 112(1): 89–97.
https://doi.org/10.1016/s0269-7491(00)00096-8

21. *Pandey V.C., Singh K., Singh R.P., Singh B.* 2012. Naturally growing *Saccharum munja* L. on the fly ash lagoons: A potential ecological engineer for the revegetation and stabilization. – Ecol. Eng. 40: 95–99.
https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.019

22. *Lichtenthaler H.K.* 1987. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. – Methods in Enzymology. 148: 350–382.
https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1

23. *Ivanov Yu.V., Savochkin Yu.V., Kuznetsov V.V.* 2011. Scots pine as a model plant for studying the mechanisms of conifers adaptation to heavy metal action: 1. Effects of continuous zinc presence on morphometric and physiological characteristics of developing pine seedlings. – Russ. J. Plant Physiol. 58(5): 871–878.
https://doi.org/10.1134/S1021443711050104

24. *Borgegård S.-O., Rydin H.* 1989. Biomass, root penetration and heavy metal uptake in birch, in a soil cover over copper tailings. – J. Appl. Ecol. 26(2): 585–595.
https://doi.org/10.2307/2404084

25. *Hagen-Thorn A., Stjernquist I.* 2005. Micronutrient levels in some temperate European tree species: a comparative field study. – Trees. 19(5): 572–579.
https://doi.org/10.1007/s00468-005-0416-5

26. *Kabata-Pendias A., Pendias H.* 2001. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, Fl. 403 p.
https://doi.org/10.1201/9781420039900

27. *Drozdova I.V., Alekseeva-Popova N.V., Belyaeva A.I.* 2015. [Levels of heavy metals in the system soil-plant in some especially protected natural territories of St. Petersburg and Leningrad region.]. – In: [Environmental problems of industrial cities. Proceedings of 7-th Russian scientific-practical conference with international participation]. Saratov. P. 251–254. (In Russian)

28. *Graham R.* 1981. Absorption of Copper by Plant Roots. – In: Copper in Soils and Plants. Sydney. P. 141–163.

29. *Kozlov M., Haukioja E., Bakhtiarov A., Stroganov D., Zimina S.* 2000. Root versus canopy uptake of heavy metals by birch in an industrially polluted area: contrasting behaviour of nickel and copper. – Environ. Pollut. 107(3): 413–420.
https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00159-1

30. *Maurice C., Lagerkvist A.* 2000. Using *Betula pendula* and *Telephora caryophyllea* for soil pollution assessment. – Soil Sediment Contam. 9(1): 31–50.
https://doi.org/10.1080/10588330091134185

31. *Liao M., Hedley M., Woolley D., Brooks R., Nichols M.* 2000. Copper uptake and translocation in chicory (*Cichorium intybus* L. cv. Grasslands Puna) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Rondy) plants grown in NFT system. I. Copper uptake and distribution in plants. – Plant and Soil. 221(2): 135–142.
https://doi.org/10.1023/A:1004731415931

32. *Jing Y., Cui H., Li T., Zhao Z.* 2014. Heavy metal accumulation characteristics of Nepalese alder (*Alnus nepalensis*) growing in a lead-zinc spoil heap, Yunnan, southwestern China. – iForest – Biogeosciences and Forestry. 7(4): 204–208.
http://doi.org/10.3832/ifor1082-007

33. *Kuzovkina Y., Knee M., Quigley M.* 2010. Cadmium and copper uptake and translocation in five willow (*Salix* L.) species. – Int. J. Phytoremediation. 6(3): 269–287.
https://doi.org/10.1080/16226510490496726

34. *Arduini I., Godbold D.L., Onnis A.* 1996. Cadmium and copper uptake and distribution in Mediterranean tree seedlings. – Physiol. Plant. 97(1): 111–117.
https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1996.tb00486.x

35. *Drozdova I.V., Alekseeva-Popova N.V., Beljaeva A.I., Kalimova I.B.* 2014. Effect of copper, nickel and cadmium on growth and some physiological parameters of seedlings of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* (Pinaceae). – Rastitelnye resursy. 50(4): 554–566.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22260671 (In Russian)

36. *Rabêlo F., Gaziola S., Rossi M., Silveira N., Wójcik M., Bajguz A., Piotrowska-Niczyporuk A., Lavres J., Linhares F., Azevedo R., Vangronsveld J., Alleoni L.* 2021. Unraveling the mechanisms controlling Cd accumulation and Cd-tolerance in *Brachiaria decumbens* and *Panicum maximum* under summer and winter weather conditions. – Physiol. Plant. 173(1): 20–44.
https://doi.org/10.1111/ppl.13160

37. *Seregin I.V., Kozhevnikova A.D.* 2008. Roles of root and shoot tissues in transport and accumulation of cadmium, lead, nickel, and strontium. – Russ. J. Plant Physiol. 55(1): 1–22.
https://doi.org/10.1134/S1021443708010019

38. *Kozhevnikova A.D., Seregin I.V., Schat H. 2020.* Accumulation of nickel by excluder *Thlaspi arvense* and hyperaccumulator *Noccaea caerulescens* upon short-term and long-term exposure. – Russ. J. Plant Physiol. 67(2): 303–311.
https://doi.org/10.1134/S1021443720020089

39. *Gussarsson M.* 1994. Cadmium-induced alterations in nutrient composition and growth of *Betula pendula* seedlings: the significance of fine root as a primary target for cadmium toxicity. – J. Plant Nutrition. 17(12): 2151–2163.
https://doi.org/10.1080/01904169409364871

40. *Brekken A., Steinnes E.* 2004. Seasonal concentrations of cadmium and zinc in native pasture plants: consequences for grazing animals. – Science of the Total Environment. 326(1–3): 181–195.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.023

41. *Myalik A.N., Dashkevich M.M., Galuc O.A.* 2020. Microelement composition of plant raw materials of warty birch in the conditions of the south-west of Belarus. In: [From plant to medicinal product. Abstracts of the international scientific conference]. Moscow. P. 260–269.
http://hbc.bas-net.by/hbcinfo/books/Mialik2020-2.pdf (In Russian)

42. *Kuznetsova T.Yu., Vetchinnikova L.V., Titov A.F.* 2015. Heavy metals accumulation in various organs and tissues of birch trees depending on growth conditions. – Transactions of KarRC RAS. Ecological Studies Series. 1: 86–94.
https://doi.org/10.17076/eco27 (In Russian)

43. *Naumenko O.A., Sokolova O.Y., Bibarceva E.V.* 2015. [Characteristics of the species-specific features of cadmium binding in trees of the city of Orenburg]. – Vestnik of the Orenburg State University. 10(185): 225–228.
http://vestnik.osu.ru/2015_10/51.pdf (In Russian)

44. *Fernández R., Bertrand A., Casares A., García R., González A., Tamés R.S.* 2008. Cadmium accumulation and its effect on the in vitro growth of woody fleabane and mycorrhized white birch. – Environ. Pollut. 152(3): 522–529.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.07.011

45. *Reeves R., Baker A., Jaffré T., Erskine P., Echevarria G., van der Ent A.* 2017. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. – New Phytol. 218(2): 407–411.
https://doi.org/10.1111/nph.14907

46. *Barceló J., Poschenrieder C.* 1990. Plant water relations as affected by heavy metal stress: A review. – J. Plant Nutr. 13(1): 1–37.
https://doi.org/10.1080/01904169009364057

47. *Usmanov I.Yu., Rahmankulova Z.F., Kulagin A.YU.* 2001. [Ecological plant physiology]. Moscow. 224 p. (In Russian)

48. *Öncel I., Keleş Y., Üstün A.* 2000. Interactive effects of temperature and heavy metal stress on the growth and some biochemical compounds in wheat seedlings. – Environ. Pollut. 107(3): 315–320.
https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00177-3

49. *Zengin F., Munzuroglu O.* 2005. Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, proline and some antioxidant chemicals in bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) seedlings. – Acta biologica Cracoviensia. Series botanica. 47(2): 157–164. https://abcbot.pl/pdf/47_2/157-164.pdf
50. *Salisbury A., Gallagher F., Caplan J., Grabosky J.* 2018. Maintenance of photosynthesis by *Betula populifolia* in metal contaminated soils. – Sci. Total Environ. 625: 1615–1627. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.279
51. *Gussarsson M., Jensen P.* 1992. Effects of copper and cadmium on uptake and leakage of $K^+$ in birch (*Betula pendula*) roots. – Tree Physiol. 11(3): 305–313. https://doi.org/10.1093/treephys/11.3.305
52. *Zhang X., Gao B., Xia H.* 2014. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of bana grass and vetiver grass. – Ecotoxicol. Environ. Saf. 106: 102–108. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.04.025
53. *Rabêlo F.H.S., Lux A., Rossi M.L., Martinelli A.P., Cuypers A., Lavres J.* 2018. Adequate S supply reduces the damage of high Cd exposure in roots and increases N, S and Mn uptake by Massai grass grown in hydroponics. – Environ. Exp. Botany. 148(4): 35–46. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.01.005
54. *Cheremisina A.I., Shevyakova N.I., Kuznetsov Vl.V.* 2012. Dynamics of Ni accumulation and possible causes of Fe deficiency in Amaranthus hybrids leaves. – Bulletin of People's Friendship University of Russia: Ser. Agronomy and animal industries. 3: 21–30. http://agrojournal.rudn.ru/agronomy/article/view/1718 (In Russian)
55. *Sebastian A., Prasad M.* 2016. Iron plaque decreases cadmium accumulation in *Oryza sativa* L. and serves as a source of iron. – Plant Biol. 18(6): 1008–1015. http://doi.org/10.1111/plb.12484
56. *Burton K., Morgan E., Roig A.* 1986. Interactive effects of cadmium, copper and nickel on the growth of sitka spruce and studies of metal uptake from nutrient solutions. – New Phytol. 103(3): 549–557. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1986.tb02892.x
57. *Wang M., Zou J., Duan X., Jiang W., Liu D.* 2007. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.). – Bioresour. Technol. 98(1): 82–88. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.028

**EDN:** BVIXEX
*РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, 2022, том 58, вып. 2, с. 197–216*

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

# ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФИТОМАССЫ НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА В ЛЕСУ (ОБЗОР МЕТОДОВ)

**© 2022 г. Л. С. Ермолова***
[1]*Институт лесоведения РАН, с. Успенское, Россия*
**e-mail: ls_ermolova@list.ru*

Поступила в редакцию 02.11.2021 г.
После доработки 23.02.2022 г.
Принята к публикации 03.03.2022 г.

Представлен обзор методов определения фитомассы и продукции травяного покрова в лесу, как наиболее информативных показателей биоиндикации условий среды, использования ресурсов местообитания и роли в функционировании сообщества. Дается представление о сущности и применении этих методов при решении различных экологических и ресурсоведческих проблем. Показан процесс усовершенствования классических методов с применением современных приборов и технологий. Обосновывается необходимость и намечены возможные пути совершенствования методов оценки фитомассы и продукции травяного покрова в связи с развитием новых направлений биологической науки: сохранение биоразнообразия, биоиндикация особенностей местообитания, оценка и мониторинг ресурсного потенциала лесов на разном пространственном уровне. Особое внимание уделяется развитию метода модельных растений, позволяющего после создания соответствующей нормативной базы оперативную интактную оценку фитомассы травяного покрова в лесу.

*Ключевые слова:* биологическая продуктивность, методы оценки фитомассы, травяной покров, лесные фитоценозы, метод модельных растений

**DOI:** 10.31857/S0033994622020054

Методы определения фитомассы травяного покрова начали разрабатываться еще с середины XVII в., когда из-за хозяйственных нужд возникла необходимость учета фитомассы главным образом луговой и степной растительности [1]. В зависимости от поставленных целей определялась не только общая фитомасса сообщества, но зачастую и его составляющих – отдельных видовых популяций, хозяйственных групп, жизненных форм при естественной влажности или в сухом состоянии. В области теории эти исследования проводились в рамках общей оценки методов определения значимости вида в сообществе, в частности его обилия в широком смысле [по: 2], включающего в себя и массу особей и популяций.

В истории развития методов определения фитомассы напочвенного покрова в научных исследованиях и в хозяйственных целях можно выделить несколько этапов, которые частично перекрываются. Последний из них связан с Международной биологической программой (МБП), когда в конце 60-х–начале 70-х годов XX в. и в последующие годы во многих странах одновременно по единой методике проводилось определение биологической продуктивности растительных сообществ. Основой при оценке биологической продуктивности травяного покрова в лесных фитоценозах стал метод укосов, рекомендованный во всех методических пособиях, опубликованных во время выполнения МБП и в последующие годы [3–7]. С использованием этого метода были осуществлены крупномасштабные исследования биологической продуктивности и биопродукционных процессов всех типов экосистем, в том числе и лесных [8, 3, 9–11].

Лесные фитоценозы характеризуются ярко выраженным доминированием древесной растительности, и при изучении в них продукционного процесса роль напочвенного покрова часто недооценивается или игнорируется. Действительно, в большинстве случаев доля фитомассы травяной растительности невелика (не более 4%) в сравнении с массой древостоя и насаждения в целом [12, 13]. Однако в некоторых типах леса масса его может составлять 6.7–10.4% общей фитомассы [14]. Увеличение массы травяного покрова до 20% от массы древостоя возможно также в молодняках [15]. Годичная продукция видов подлеска и травяно-кустарничкового яруса при сопоставлении в лесу слоев одинаковой вертикальной протяженности сравнима с древесным ярусом [16]. Фитомасса травяно-кустарничкового яруса является важным компонентом цикла обмена вещества и энергии в лесных биогеоценозах, одной из важ-

ных статей баланса элементов питания лесных фитоценозов [17–24]. Травянистые растения по сравнению с древесными имеют более высокое содержание минеральных веществ и азота [25–27], и по быстроте их возврата в почву травяной ярус может в 2–3 раза превосходить древостой [28, 29]. Не менее значительна роль живого напочвенного покрова в формировании опада насаждения [30, 31] и лесной подстилки [32]. Ветошь трав достаточно легко разлагается и при поглощении корнями растений нижних ярусов создает "малый круговорот" питательных элементов [12]. Травяной покров вносит значительный вклад в общее листовое покрытие и газообмен насаждения. Так, после прореживания и последующей регенерации эвкалиптового леса площадь листьев подпологовой растительности может превышать площадь верхнего яруса, и учет этого фактора повышает точность оценки названных показателей при дистанционном зондировании [33]. Эти и многие другие функциональные аспекты роли напочвенного покрова в лесу, частью рассмотренные ранее [27, 34], свидетельствуют о важности включения в описание лесных фитоценозов разносторонней характеристики напочвенного покрова в лесных экосистемах, и прежде всего его биомассы. Его фитомасса и продуктивность рекомендуются как наиболее информативные показатели использования ресурсов сообщества и их распределения по организмам [20, 35–38].

В последние десятилетия перед биологической наукой и лесохозяйственной практикой поставлен комплекс новых задач, главные из которых: сохранение биоразнообразия растительности, биоиндикация особенностей местообитания, мониторинг и оценка ресурсного потенциала лесов и прочих угодий разного пространственного уровня [24, 26, 39–44], оценка запасов горючего материала в лесах и сохранение лесов от вредителей и пожаров [21, 42], влияние рекреации и других антропогенных воздействий на растительный покров [45–47].

Однако до сих пор отсутствуют достаточно полные обзоры методов оценки фитомассы живого напочвенного покрова, с помощью которых можно было бы сделать обоснованный выбор оптимального варианта ее определения в лесу, исходя из целей исследования, за исключением нескольких публикаций, в которых этот вопрос обсуждается более или менее подробно [3, 6].

Цель этой статьи – дать краткую характеристику существующих методов изучения биологической продуктивности надземной части травяного покрова в лесу и предложить их возможную классификацию, дать представление о применении и трансформации этих методов, в том числе в историческом аспекте, наметить пути усовершенствования способов учета травянистой растительности.

Обобщение обширного материала с включением работ, выполненных исследователями разных научных школ и проведенных в разных экосистемах, затруднено из-за разночтения в терминологии и различий объема биологических понятий. F.S. Giliam [27] выяснил, что для одного и того же объекта термин "травянистый (травяной) слой" (herbaceous/herb layer) употребляется в 34.0% рассмотренных им работ, "напочвенная растительность (ground vegetation)" – в 31.1%, "напочвенный ярус (ground layer)" – в 14.9%. Другие термины (ground flora, herbaceous understory, herbaceous/herb stratum) вместе составляют 10%. В отечественных работах по лесоведению и лесоводству термин "живой напочвенный покров" относят к совокупности трав, кустарничков, мхов и лишайников. В руководстве по комплексному мониторингу "напочвенный ярус" (ground layer) соответствует мохово-лишайниковому ярусу [48]. Согласно F.S. Giliam, к травяному ярусу (ground vegetation) чаще всего причисляется слой в лесу, состоящий из всех видов сосудистых растений, высотой до 1 (1.5) метра, включающий в себя "резидентные" виды, не способные, ввиду биологических свойств, расти выше этого слоя растительности [27]. В русскоязычной геоботанической литературе этот слой определяют как травяно-кустарничковый ярус.

В данной статье мы рассматриваем методы определения фитомассы в основном надземной части травяного покрова, включающего в себя однолетние и многолетние травянистые растения. Но применение этих методов неизбежно и на первых этапах оценки фитомассы и продуктивности кустарничков и других жизненных форм.

Для оценки массы травяного покрова применяются прямые и косвенные методы.

ПРЯМЫЕ МЕТОДЫ (методы квадратов).

1. *Прямая глазомерная оценка*. Впервые метод квадратов при изучении степной растительности Аскания-Нова применил Ф. Тецман, работа которого вышла в 1839 г. [49]. Он "определял участие видов в травостое на основе весовых данных" [50: 20]. Лишь через много десятилетий этот метод стал распространяться в других странах [51].

Метод заключается в глазомерном определении массы видов растений с разной степенью покрытия на определенной площади. Достоверность глазомерного определения подтверждалась последующим взвешиванием срезанных растений. Л.Г. Раменским для доминантных видов предложена единица измерения – "проективный вес вида", т.е. масса растений вида, проективное покрытие которых составляет 1% от площади учета. На основе метода определения "проективного веса" и повидовой разборки 200–300 укосов П.Д. Яро-

шенко получено много эмпирических формул для определения надземной массы в травянистых сообществах разных по типу и степени объедания скотом [52].

J.F. Pechanec и G.D. Pickford при исследованиях на пастбищах рекомендовали, чтобы оценщик мысленно визуализировал 10, 50 или 100 г вещества растений каждого вида в квадрате определенного размера и соединил их вместе, чтобы определить общую массу растений. Визуальные оценки на квадратах затем проверялись срезанными и взвешенными по видам растениями (укосами). Такие тренировочные определения рекомендовалось продолжать до тех пор, пока показатели глазомерных оценок не станут как можно ближе подходить к весовым оценкам [37, 51].

Для решения практических проектных задач лесного или сельского хозяйства, когда обследования проводятся большими коллективами на обширных территориях, заметную негативную роль играет субъективизм исполнителей. Это обстоятельство необходимо учитывать и предварительно проводить продолжительную тренировку оценщиков [53–57].

2. *Метод укосов.* Метод укосов не связан со степенью покрытия травостоя и заключается в срезании и взвешивании растений на площадках известного размера и числа с пересчетом показателей их фитомассы на исследуемую площадь. С применением методов статистики исследовалось влияние на точность учета фитомассы числа, размера и формы площадок [58–62], способа их распределения по исследуемой площади: случайное (рандомизированное), систематическое (регулярное) в пределах всей пробной площади или в границах предварительно выделенных парцелл.

Большое влияние на оценку фитомассы методом укосов оказывает фенологический период наблюдения. Ввиду индивидуальных биологических особенностей виды в сообществе развивают наибольшую массу в разные периоды вегетационного сезона: во время конца цветения–начала плодоношения [8, 63–66]. Это время *максимальной продуктивности вида*. Учет биомассы в период наибольшего развития всего фитоценоза (*максимальная продуктивность сообщества*) не может быть показателем его *полной производительности* (*продуктивности*), т.к. часть видов уже отмирает, а другая еще не достигла полного развития. По методике, разработанной В.Б. Сочавой с сотрудниками, несколько раз за сезон методом укосов определяют массу каждого вида, а затем расчетным путем по сумме наибольших за сезон средних показателей фитомассы особей, умноженных на их число, получают *полную продуктивность сообщества*. Число побегов вида каждый раз определяли подсчетом на “модельной площадке” (8). При развитии модели в каждый срок наблюдения среднее число побегов отдельных видов на единицу площади определяли с помощью статистически вычисленной модели [67, 68]. При этом среднюю массу особи каждого вида находили взвешиванием 15–20 случайно выбранных побегов, из которых рассчитывали среднее значение.

Метод укосов характеризуется высокой точностью и используется в качестве эталонного при разработке других методов определения массы травяного покрова. Этот метод является основным при определении массы травяного покрова в лесах и с его использованием накоплен значительный объем данных о фитомассе напочвенного покрова в лесных сообществах. Однако этот метод очень трудоемок и пригоден лишь для оценки фитомассы конкретных участков достаточно ограниченного размера [69]. К тому же он деструктивен, требует удаления на учетных площадках надземной (иногда и подземной) части покрова, мало пригоден при работе в заповедниках и ООПТ, невозможен при мониторинге, когда исследования ведутся периодически на одних и тех же объектах [66, 68].

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ (косвенные), основаны на взаимосвязи между фитомассой и другими, более просто определяемыми характеристиками растительности и ее отдельных видов. В качестве переменных величин (предикторов) использовали разные показатели или их сочетания: число особей (побегов), степень проективного покрытия, среднюю высоту побегов [70], объем вещества растений или занимаемого ими пространства [71, 72], характеристика условий местообитания и показатели фитосреды (тип леса, таксационная характеристика и др.).

*Связи между массой и площадью проективного покрытия* доминантных видов используют наиболее часто [60, 70, 73–77]. Для определения проективного покрытия в природных условиях применяют ряд методов разной степени точности и пригодных для его оценки на площадях разного масштаба.

**Методы оценки степени проективного покрытия.** Сопоставление площади покрытия и фитомассы отдельных видов производят методом регрессии [72, 78–81]. При этом количественно покрытие оценивается площадью вертикальной проекции крон растений на поверхность почвы, занимаемой сообществом, выраженной в процентах. Иногда, например, в сообществах с доминированием дерновинных злаков, выделяют *истинное покрытие* или степень задерненности – площадь почвы, занятой основаниями побегов или дерновин [1, 70, 82, 83].

При общих геоботанических обследованиях степень покрытия в растительных сообществах разных типов и долю участия в них отдельных видов определяют глазомерно с помощью каче-

ственных, смешанных или количественных шкал разной дробности, таковы шкалы Друде, Браун-Бланке, Домина, Крайины и пр. [84]. Термины, которые ранее использовались при описании покрытия растений и общие понятия о методах его измерения, обсуждаются и уточняются в научной литературе и в настоящее время [85–88]. Для учета покрытия разработано несколько способов, различающихся точностью, степенью сложности и скоростью определения.

1. *Метод картирования или зарисовок* и последующей инструментальной оценки площади покрытия отдельных видов считается наиболее точным и при сравнении с другими методами учета принимается в качестве контрольного. Он особенно эффективен при многолетнем мониторинге на небольших площадках (1–0.25–0.001 м$^2$) в сочетании с перечетом особей. Но этот метод требует больших затрат труда и времени.

2. *Глазомерная оценка покрытия* (без зарисовки) с помощью сеточек Раменского, шаблонов и других приспособлений [70, 83]. По методике Л.Г. Раменского [69] при описании крупных учетных площадей сначала при помощи сеточки и эталона полнот определяется общая полнота травостоя, а затем глазомерное проективное покрытие каждого вида. Суммированием оценок проверяется их правильность: общая сумма оценок должна быть равна общей полноте плюс ярусное перекрытие. При несовпадении оценок проводится повторная оценка покрытия.

Сравнительно небольшие трудозатраты глазомерного метода привлекают исследователей и ведут к поиску новых вариантов этого метода. У растений со слабо выраженной дифференциацией размера листьев (ясменник, грушанки) достаточно определения среднего размера листа прибором и дальнейшего подсчета их числа для оценки общего покрытия вида на небольшой площади [89]. Оригинальный и быстрый способ оценки проективного покрытия, основанный на сравнении площади поверхности листьев или небольших плотных группировок мелких растений с площадью простого шаблона – ладони наблюдателя, протестирован при изучении травяного яруса лиственного леса умеренной зоны на западе США. Для отдельных особей, популяций и в масштабе сообщества детерминированность метода ($R^2$) составила 0.97, 0.93 и 0.87 соответственно [90].

3. *Метод линейных трансект или пересечения линий* (англ.: “line interception method”). Оценка покрытия проводится с помощью мерных лент (рулеток), протянутых в случайном направлении в травяном покрове исследуемого участка. Суммируется длина отрезков ленты, визуально пересекающих проекцию каждого вида. Эта сумма выражается в процентах от общей длины трансекта [63, 83, 91].

4. *Точечный метод (метод касаний)* (англ.: “point intercept method”) основан на подсчете доли точек на земле с наличием или отсутствием над ними растительного материала или касаний (уколов) растений каждого вида иглой, для чего игла или рамка с металлическими иглами (прутами), проходящими сквозь ее верхнюю рейку, многократно вертикально устанавливается в травяном покрове [92, 79]. Этот метод “обеспечивает получение реальной величины покрытия, точность которой может быть повышена до любой желаемой степени путем увеличения объема выборки” [25, 43, 93]. Данные покрытия, полученные по отдельным видам растений, часто суммируются для оценки общего покрытия растительности [94]. Поскольку листья растений перекрываются в вертикальном направлении, то их общее покрытие может быть выше 100% [85].

На основе количественных оценок проективного покрытия (%) для удобства сравнения фитоценозов составляются шкалы с разными по дробности ступенями [54, 65]. Преимущество количественных шкал в том, что они позволяют обработку данных статистическими методами и построение на их основе математических моделей фитомассы. Недостаток же их в том, что каждый исследователь “назначает” число ступеней и их процентное содержание по своему усмотрению, что приводит к невозможности сопоставления оценок разных авторов [39, 95, 96]. Предпочтительными считаются логарифмические шкалы [91].

Указанные методы оценки покрытия неоднократно применялись исследователями разных стран для доминантных видов в лесах разных природных зон [29, 33, 42, 54, 90, 97]. Сравнение способов и полученных дисперсий с помощью соответствующих статистических тестов показало, что для практических целей все эти методы дали достаточно сходные результаты и были приблизительно одинаковы по надежности. Однако, точечный метод признается наиболее приемлемыми по затратам труда и времени, хотя и требующими большого массива данных [43, 57, 60, 73, 83, 94, 95, 98, 99].

Метод корреляции степени проективного покрытия и массы растений с математическими обоснованиями с 1936 г. разрабатывался в западных странах при учете кормовых угодий [51, 63]. При сопоставлении с методом укосов он назван “методом двойной выборки” [37, 62, 79]. Он заключается в глазомерной оценке покрытия на больших площадях (600 квадратов) и коррекцию ее малыми выборками *сухой* массы доминирующих видов на небольших площадках любого размера и формы (100 квадратов). Зависимость оказывается близкой к линейной регрессии, проходящей через 0. Тот же вывод о линейной связи проективного покрытия с величиной фитомассы

в *сухом* состоянии сделан в публикации [98]. Связь между проективным покрытием и *сырой* массой травянистых растений неморального леса, а также бореального кустарничка (брусника) в сосняке криволинейна [73, 77].

**Корреляция с объемом занимаемого пространства.** В экстремальных местообитаниях с недостатком влаги или тепла, в которых фитоценозы отличаются малым числом видов и неполной сомкнутостью растительного покрова, для определения фитомассы крупных видов, чаще всего полукустарников или кустарничков, использовался объемный метод, иногда называемый размерно-аналитическим [78, 100]. Объем экземпляров (размер занимаемого ими пространства), полученный – по аналогии с расчетом объема геометрических фигур – измерениями диаметра или окружности и длины кроны, соотносился с фитомассой особей или ее отдельных параметров: массой, поверхностью или числом листьев, отдельных ветвей. В регрессионных уравнениях объем принимался как независимая переменная по отношению к зависимой от него фитомассе [72, 78].

В каждом конкретном случае выбор наиболее подходящего метода должен соответствовать целям исследования, требуемой точности, квалификации кадров, простоте использования, а также затратам на оборудование и рабочую силу [71]. Применение разных методов оценки запаса фитомассы и степени покрытия обусловлено морфологическими особенностями видов. Дополнительное разделение видов на группы с разной морфологией, учет сезонных различий в развитости листьев увеличивает точность прогноза фитомассы по покрытию или объему и уменьшает величину варьирования и систематическую ошибку [11, 44, 53, 64, 65, 76, 80, 101].

*Методы оценки массы мохового покрова* в целом сходны с определением фитомассы травяно-кустарничкового яруса [102]. Наиболее подробно представлен метод укосов в сравнении с глазомерной оценкой покрытия на примере лугового вида мха *Thuidium recognitum* (HEDW.) LINDB. На площадках 20 × 20 см, равномерно разделенных сеткой на 100 ячеек, глазомерно определяли покрытие сравнением с эталоном. Вычисляли среднее покрытие для ячейки, средние высоту стеблей и фитомассу. По данным 55 укосов составлены номограммы и таблицы переводных коэффициентов от покрытия к фитомассе побегов мха разной высоты [103].

В лесах с развитой парцеллярной структурой масса мхов в наземном покрове довольно резко различается по парцеллам. Здесь оценка массы мхов по парцеллам с последующим расчетом величин их площади дает в 4 раза более высокую точность, чем в среднем для типа леса, и только на 25% повышает число необходимых площадок [104].

**Усовершенствование классических методик.** В настоящее время появились новые технические возможности, новые устройства и приспособления позволяющие усовершенствовать классические методики определения проективного покрытия и запасов фитомассы [71, 99]. Методы картирования, зарисовок и даже линейный и точечный методы в настоящее время заменяются более быстрым методом цифрового фотографирования с расшифровкой фотографий при помощи компьютерных программ [33, 76, 77, 86, 97, 107–109]. Но фотографические методы не позволяют точно измерить покрытие плотных и структурно сложных сообществ, например, в лиственном лесу умеренной зоны [90]. Метод шаблонов сейчас упрощен сравнением природных объектов или их фотографий с генерируемыми компьютером изображениями популяций отдельных видов с известной степенью покрытия, а при точечном методе металлические спицы заменяет лазерный луч [108, 110]. На больших открытых площадях применяются беспилотные летательные аппараты и малая авиация, снабженные электронными автоматическими приборами [108, 111].

В Европе (в частности в Германии) с конца 90-х годов исследовалась возможность использования лесной напочвенной растительности в качестве главного критерия при биоиндикации характеристик местообитания и видового разнообразия в рамках обширной программы мониторинга EU Level II-Programms [40, 66]. Для научно обоснованной оценки надземных запасов сухого вещества, углерода и питательных элементов живого напочвенного покрова был разработан компьютеризированный метод, названный моделью ФитоКальк (PhytoCalc). Модель PhytoCalc представлена следующей нелинейной функцией:

$$z = ax^b y^c,$$

где $z$ – надземная фитомасса в сухом состоянии (г м$^{-2}$), $x$ – покрытие (%), $y$ – средняя длина побега (см), $a$, $b$ и $c$ – коэффициенты регрессии, специфичные для отдельных видов [24].

В качестве наиболее ранней работы, на основе которой разрабатывалась модель PhytoCalc, обычно приводится статья [113]. Используя статистический анализ фитомассы напочвенного покрова в лесах черничного типа, С. Келломяки приходит к выводу, что для наиболее точного прогноза содержания сухого вещества от суммы покрытий видов, модель должна быть адаптирована по “взвешенному коэффициенту” или “весу” покрытия, т.е. по предложенному ранее Раменским [69] *содержанию сухого вещества вида в единице покрытия* (“проективный вес вида”). При этом учитывается, что разные виды и группы видов (черника, брусника, злаки, разнотравье), а в их пределах и слои с разной высотой побегов, имеют

разную массу на одну и ту же единицу покрытия. Эта модель также описывает фитомассу моховолишайникового яруса относительно покрытия и высоты входящих в него видов или групп видов.

Изначально модель PhytoCalc базировалась на расчете коэффициентов нелинейных видоспецифичных функций 40 доминирующих в равнинных условиях видов лесного напочвенного покрова. Эти виды были объединены в 13 групп по высоте и жизненной (ростовой) форме: 1) мелкие травы (KK), 2) средние травы (MK), 3) крупные травы (GK), 4) мелкие злаки (KG), 5) средние злаки (MG), 6) крупные злаки (GG), 7) папоротники (F), 8) крупные папоротники (GF), 9) кустарнички (ZS), 10) мелкие кустарники (KS), 11) подушковидные мхи (PM), 12) дерновые мхи (RM), 13) плотные мхи (DM). Для каждой из групп рассчитывали средний показатель длины побегов, определяли коэффициенты модели фитомассы и оценивали содержание углерода и элементов питания [24].

Дальнейшее развитие модели заключалось в ее адаптации к новым местообитаниям. Возможность оценки фитомассы напочвенного покрова в нагорных условиях была реализована за счет включения в рассчитанную для равнинных условий модель пяти новых видов [26]. Также рассмотрена возможность применения обеих версий PhytoCalc к условиям открытой вырубки [28].

Было установлено, что в условиях сплошной вырубки представленная модельная версия в ряде случаев может давать существенные отклонения. Это обусловлено тем, что содержание сухого вещества в единице площади листа (у авторов – LDMC) при высокой освещенности, как правило, выше в сравнении с удельной плотностью листа под пологом леса. Поэтому в качестве корректирующего фактора для адаптации PhitoCalc-модели к условиям вырубки целесообразно использовать отношение LDMC вида на сплошной вырубке к этому показателю в лесу [29].

В бореальной зоне до недавнего времени не было моделей для оценки фитомассы напочвенного покрова растительности заболоченных лесов, которые занимают здесь значительную площадь и играют важную роль в углеродном цикле и углеродном балансе. В Финляндии P. Muukkonen с коллегами [113] создали модель, связывающую фитомассу и процентное покрытие подпологовой растительности не только в плакорных лесах (224 описания), но и в заболоченных торфяных лесах (195 описаний). Особенность этой модели (как и PhitoCalc) – оценка массы наземной растительности по группам видов-доминантов взамен отдельных видов. Живой напочвенный покров в бореальных лесах, как правило, состоит из нескольких горизонтальных слоев. При моделировании выделяются два слоя: верхний, травяно-кустарничковый, включающий кустарнички, злаковидные травы (злаки + осоки) и разнотравье, и нижний, состоящий из мохообразных и лишайников. Доминантные и содоминантные виды могут составлять здесь более 90% общей надземной биомассы.

Надземная биомасса ($y$) травяно-кустарничкового яруса в плакорных лесах была смоделирована с помощью смешанной *линейной* модели $y = b_1x + u$; мохообразных и лишайников в плакорных лесах, а также видов обоих слоев в торфяных заболоченных лесах представлена смешанной *нелинейной* моделью: $y = u + x^2/(b_0 + b_1x)^2$, где $x$ – процентное покрытие, $b_0$ и $b_1$ – фиксированные параметры популяции, $u$ – случайный параметр. Параметры оценивались с помощью нелинейной смешанной программы SAS [114].

Рассмотренные модели разработаны для крупномасштабных инвентаризаций в Финляндии, основываются исключительно на взаимосвязи между процентом покрытия и биомассой и являются региональными. Они мало зависят от возраста древостоя, не учитывают морфологию, ростовые характеристики видов, размеры растений и видовой состав. Моделирование стало возможно вследствие использования данных о повидовой фиксации процентного покрытия наземной растительности, полученных на действующих постоянных пробных площадях, сеть которых создавалась Национальной инвентаризацией лесов Финляндии, начиная с 1951 г. и охватывает всю страну. Авторы рекомендуют использовать эти модели для определения фитомассы растительности нижних ярусов бореальной зоны в условиях, близких к Фенно-Скандии и Карелии.

Наиболее распространенный метод укосов из-за его трудоемкости, деструктивности, ограниченной площади применения во многих случаях не позволяет решить вновь возникающие проблемы, поэтому появилась необходимость расширения спектра используемых при изучении травяного покрова в лесу методов, их усовершенствования и поиска новых способов определения его продуктивности. В сомкнутых лесных фитоценозах оценка фитомассы подпологовых ярусов методами дистанционного зондирования вряд ли возможна, и необходимо применение способов, основанных на других критериях, например, на оценке средней фитомассы и численности индивидуумов.

## МЕТОД МОДЕЛЬНЫХ РАСТЕНИЙ

Многие приведенные выше методические концепции включают в себя метод модельных растений, различные варианты которого могут использоваться при определении массы и годичной продукции травяного покрова. Эти методы демонстрируют возможность и необходимость

оценки продуктивности травяно-кустарничкового покрова на основе средней фитомассы и числа особей [8, 52, 67, 68, 70, 76, 115]. Большое значение в разработке метода определения продуктивности травяного покрова, основанного на подсчете количества побегов и определении их среднего веса, придавал Т.А. Работнов [116, 117]. Наряду с универсальностью, этот метод характеризуется довольно высокой точностью, относительно небольшой трудоемкостью и недеструктивностью. При таком подходе метод модельных растений для оценки фитомассы видов живого напочвенного покрова приближается к методам модельных деревьев в лесоведении [73, 118]. В зарубежных работах [53, 78, 119] этот метод назван методом эталонных единиц (англ.: "reference unit method").

Для видов мохового покрова (напр. Sphagnum) также возможно определение фитомассы и продукции на основе учета массы единичной части растения (побега) и числа их на единицу площади. Для всех видов сфагнума масса годичного прироста напрямую зависит от его длины. Масса же единичной части стебля находится в обратной криволинейной зависимости от плотности дернины [120].

Широкому внедрению этого метода в практику научных исследований препятствует ряд причин, и, прежде всего, очень ограниченный объем сведений о морфологии, биологической продуктивности и площади поверхности отдельных особей наиболее распространенных видов. При выборе "модельных растений" для каждого вида важно решить вопрос (и указывать это в описании методики), что считается модельным растением: особь, побег или рамета, т.е. что принимается за "единицу учета". В пределах популяций нужно учитывать вариации фитомассы по возрастным состояниям, фенологическим стадиям, оценивать структуру и продуктивность видов вдоль градиентов изменения среды [44, 74, 121]. Одними из главных элементов базы данных "модельных растений" должна стать средняя фитомасса, фотосинтетическая и общая поверхность, плотность тканей и пр. генеративных и вегетативных особей наиболее распространенных видов в период их максимального развития в различных типах леса. При изучении вопросов заготовки сырья и рационального использования природных ресурсов важно также учитывать долю полезного продукта хозяйственно ценных видов.

В зарубежной научной литературе неоднократно поднимался вопрос о сборе и систематизации информации о морфо-физиологических характеристиках отдельных видов [122]. Однако в известных "Биологических Флорах" разных регионов, за редким исключением, почти не заходит речь о средних показателях фитомассы или продукции отдельных особей (индивидуумов). Но для некоторых регионов (пастбища Южной Африки) на основе оценки покрытия разработаны шкалы числа особей (Plant Number Scale – PNS) для всех хозяйственно ценных видов. С использованием компьютерной программы классификации растительности PHYTOTAB по проценту покрытия каждого зарегистрированного вида и средней массе индивидуума определяется фитомасса вида и каждого растительного сообщества (кг га$^{-1}$). Сравнения показали достоверное сходство в фитомассе, определяемой с помощью шкал PHYTOTAB/PNS и методики укосов [123].

В "Биологической флоре Московской области", несмотря на то, что позиция "биологическая продуктивность" введена в стандартный формат характеристик видов, из 220 описанных видов трав и кустарничков информация о продуктивности дана только для 86 видов (39%), а о фитомассе особей – для 42 видов (19%). Следует отметить, что данных о фитомассе особей, иногда в связи с популяционной структурой и сезонной динамикой, с годами становится все больше: от 4–18% в 1975–1980 гг. до 50–67% в 1993–2003 гг.

В ходе исследований в этом направлении нами получены уравнения связи линейных параметров листьев (длина, ширина) с площадью их поверхности, определена средняя удельная площадь листовой поверхности (SLA – specific leaf area) для 90 видов травяно-кустарничкового яруса мелколиственных и хвойных лесов средней полосы России [124], а также фитомасса среднего побега более 50 видов с точностью 5–20%.

Информация о средних показателях фитомассы особей травянистых видов и кустарничков с учетом их морфологии – фракционного состава, площади поверхности листьев и других характеристик, может иметь широкий диапазон применения. Она необходима при решении большого ряда научных и ресурсоведческих проблем: 1) при определении производительности экосистем в связи с потенциальными возможностями среды, стока и депонирования углерода и т.д.; 2) при выявлении полной за сезон продуктивности травянистых сообществ; 3) для функционального анализа реакции видов и сообществ на изменения среды обитания, наблюдения направленных сукцессий или погодичных флуктуаций; 4) при установлении корреляционных взаимосвязей наземных и дистанционных методов оценки продуктивности фитоценозов; 5) в заповедниках и на особо охраняемых территориях, где недопустимо нарушение целостности растительного покрова; 6) при детальном изучении разных составляющих баланса продукции видов травяного покрова; 7) при оценке внутрипопуляционного биоразнообразия растений в экосистемах [125]; 8) при анализе способов выживания и прогнозировании

уязвимости или жизнеспособности видов в стрессовых ситуациях.

Разработанные к настоящему времени методы определения массы и продукции травяного покрова дают возможность выбора метода, наиболее соответствующего решаемым задачам. Вместе с тем экстраполяция результатов исследований на территориальные единицы более высокого ранга еще не решена и требует дальнейшего развития и совершенствования косвенных методов определения биологической продуктивности травяного покрова [126]. Для широкого внедрения метода модельных растений в практику необходимо создание для большинства наиболее распространенных видов нормативной базы в виде таблиц и регрессионных моделей, отражающих зависимость массы растений от их видовых и морфологических характеристик.

Разработка новых методов оценки продуктивности живого напочвенного покрова с учетом новых задач может способствовать рациональному использованию природных ресурсов и составить методическую базу для важных управленческих решений [24, 48, 127].

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит д. б. н. А.А. Маслова и к. б. н. Я.И. Гульбе за прочтение рукописи, ценные замечания и советы. Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А19-119053090074-7.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Браун Д.* 1957. Методы исследования и учета растительности. Перевод с англ. М. 316 с.
2. *Василевич В.И.* 1969. Статистические методы в геоботанике. Л. 232 с.
3. *Newbould P.J. et al.* 1967. Methods for estimating the primary production of forests. International Biological Programme. London.
4. *Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И.* 1968. Методические указания к изучению динамики биологического круговорота в фитоценозах. Л. 143.
5. *Уткин А.И.* 1975. Биологическая продуктивность лесов: Методы изучения и результаты. Итоги науки и техники. – В сб.: Лесоведение и лесоводство. М. 4: 9–189.
6. *Методы* изучения лесных сообществ. 2002. СПб.: 240 с.
7. *Усольцев В.А., Залесов С.В.* 2005. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург. 147 с.
8. *Сочава В.Б., Липатова В.В., Горшкова А.А.* 1962. Опыт учета полной продуктивности надземной части травяного покрова. – Бот. журн. 47(4): 473–484. http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=1397&rid=pdf_0001388
9. *Brechtl J., Kubíček F.* 1968. Príspevok k poznaniu primárnej produkcie bylinnej vrstvy lesných spoločenstiev [Contribution to the knowledge of the primary production of the herbaceous layer of forest communities]. – Biológia (Bratislava). 23(4): 305–316.
10. *Kubiček F., Brechtl J.* 1970. Production and phenology of the herb layer in an Oak-Hornbeam forest. – Biológia (Bratislava). 25(10): 651–66.
11. *Vašíček F.* 1985. Structure and biomass of the herb layer. – Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology. 15(A): 171–238. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-99566-7.50010-X
12. *Höhne H.* 1962. Vergleichende Untersuchungen über Mineralstoff und Stickstoffgehalt sowie Troskensubstanzproduction von Waldbodenpflanzen. [Comparative studies on mineral and nitrogen content as well as dry substance production of forest soil plants]. – Arch. Forstwesen. 11(10): 1085–1141. (In German)
13. *Курбанов Э.А.* 2002. Бюджет углерода сосновых экосистем Волго-Вятского района. Йошкар-Ола. 298 с.
14. *Вакуров А.Д., Полякова А.Ф.* 1982. Круговорот азота и зольных элементов в низкопродуктивных ельниках северной тайги. – В кн.: Круговорот химических веществ в лесу. М. С. 20–43.
15. *Ермолова Л.С.* 1986. Эколого-фитоценотические группы и фитомасса травяного покрова. – В кн.: Вертикально-фракционное распределение фитомассы в лесах. М. С. 110–117.
16. *Карманова И.В.* 1983. Взаимосвязь между жизненной формой особи и продуктивностью. – Журн. общей биологии. 44(4): 461–467.
17. *Терешенкова И.А.* 1962. Влияние напочвенной растительности в ельниках на запасы подстилок и содержание в них азота, фосфора и калия. – Бот. журн. 47(7): 995–1000. http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=1468&rid=pdf_0001459
18. *Киселева Н.К., Карпачевский Л.О.* 1971. Участие травяного покрова в круговороте веществ в дубо-ельнике волосистоосоковом. – В кн.: Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах. Л.: 235–240.

19. *Оськина Н.В. Ермолова Л.С.* 1982. Содержание азота в почвах, надземной фитомассе и годичной продукции сероольшаников. – В кн.: Биологическая продуктивность лесов Поволжья. М.: 142–146.
20. *Guo Q., Rundel P.W.* 1997. Measuring dominance and diversity in ecological communities choosing the right variables. – J. Veg. Sci. 8(3): 405–408.
https://doi.org/10.2307/3237331
21. *Nilsson M.-Ch., Wardle D.A.* 2005. Understory vegetation as a forest ecosystem driver: evidence from the northern Swedish boreal forest. – Front. Ecol. Environ. 3(8): 421–428.
https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0421:UVAAFE]2.0.CO;2
22. *Максимова В.Ф., Голубева Е.И.* 2008. Ценотическая значимость видовых популяций растений травяного яруса широколиственно-кедровых лесов восточного Сихотэ-Алиня. – Вестник Московского университета. Сер. 5. 4: 53–57.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11668449
23. *Телеснина В.М.* 2015. Постагрогенная динамика растительности и свойств почвы в ходе демутационной сукцессии в Южной тайге. – Лесоведение. 4: 293–306. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23906220
24. *Bolte A.* 2006. Biomass- und Elementforräte der Bodenvegetation auf Flächen des forstlichen Umveltmonitorings in Rheinald-Pfalz (BZE, EU Level II). – In: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B. Bd. 72. 80 p.
25. *Вакуров А.Д., Полякова А.Ф.* 1982. Круговорот азота и зольных элементов в 35-летнем осиннике. – В кн.: Круговорот химических веществ в лесу. М. С. 44–54.
26. *Bolte A., Lambertz B., Steinmeyer A., Kallwelt K., Meesenburg H.* 2004. Zur Funktion der Bodebvegetation im Nährstoffhaushalt von Wäldern – Studien auf Dauersbeobachtungsflächen des EU Level II-Programms in Norddeutschland. – Forstarchiv. 75: 207–219.
27. *Gilliam F.S.* 2007. The Ecological Significance of the Herbaceous Layer in Temperate Forest Ecosystems. – BioScience. 57(10): 845–858.
https://doi.org/10.1641/B571007
28. *Klink U., Fröhlich D.* 2009. Application of the phytomass and elemental stock model "PhytoCalc" under clear-cut conditions. – Allg. Forst Jagdztg. 180: 15–21.
https://www.sauerlaender-verlag.com/download/02-klinck/?wpdmdl=1330
29. *Heinrichs S., Bernchardt-Römermann M., Schmidt W.* 2010. The estimation of aboveground biomass and nutrient pools of understorey plants in closed Norway spruce forests and on clearcuts. – Eur. J. For. Res. 129(4): 613–624.
https://doi.org/10.1007/s10342-010-0362-7
30. *Hughes M.K.* 1970. Ground vegetation and forest litter production. – In.: Methods of study in soil ecology: Proceedings of the Paris symposium organized by UNESCO and the International Biological Programme. UNESCO, Paris. P. 145–150.
https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000015320
31. *Дымов А.А., Бобкова К.С., Тужилкина В.В., Ракина Д.А.* 2012. Растительный опад в коренном ельнике и лиственно-хвойных насаждениях. – Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 48(3): 7–18.
http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/e87/gkuj1.pdf
32. *Попова Э.П., Шугалей Л.С.* 2000. Формирование и биологическая активность подстилок под одновозрастными культурами основных лесообразующих пород Сибири. – Лесоведение. 6: 32–38.
33. *Macfarlane C., Ogden G.N.* 2012. Automated estimation of foliage cover in forest understorey from digital nadir images. – Methods Ecol. Evol. 3(2): 405–415.
https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00151.x
34. *Ермолова Л.С., Гульбе А.Я., Лункова Н.Ф.* 2017. Роль живого напочвенного покрова в лесу: взгляды Г.Ф.Морозова и современное состояние вопроса. – В сб.: Актуальные проблемы ботаники и охраны природы: Науч. статьи Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 150-летию со дня рождения Г.Ф. Морозова. Симферополь. С. 31–37.
35. *Базилевич Н.И., Пузаченко Ю.Г.* 1980. Организация наблюдений и исследований по программе геосистемного мониторинга в биосферных заповедниках. – Известия АН СССР. Сер. географ. 2: 120–129.
36. *Уткин А.И., Рождественский С.Г., Гульбе Я.И., Каплина Н.Ф.* 1988. Продукционная инвариантность древостоев. – Лесоведение. 2: 12–23.
37. *Pieper R.D.* 1988. Rangeland vegetation productivity and biomass. – In: Vegetation science applications for rangeland analysis and management. Handbook of vegetation science, vol 14. Dordrecht: P. 449–467.
https://doi.org/10.1007/978-94-009-3085-8_18
38. *Chiarucci A., Wilson J.B., Anderson B.J., De Dominicis V.* 1999. Cover *versus* biomass as an estimate of species abundance: does it make a difference to the conclusions? – J. Veg. Sci. 10(1): 35–42.
https://doi.org/10.2307/3237158
39. *Peet R., Wentworth T.R., White P.S.* 1998. A flexible, multipurpose method for recording vegetation composition and structure. – Castanea. 63(3): 262–274.

40. *Schulze L.-M., Bolte A., Schmidt W., Eichhorn J.* 2009. Phytomfss, Litter and Net Primary Production of Herbaceous Layer. – In: Functioning and Management of European Beech Ecosystems. Berlin, Heidelberg: 155–181. https://doi.org/10.1007/b82392_11

41. *Dengler J.* 2009. A flexible multi-scale approach for standardised recording of plant species richness patterns. – Ecol. Indic. 9(6): 1169–1178. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.02

42. *Serbin Sh.P., Gower S.T., Ahl D.E.* 2009. Canopy dynamics and phenology of a boreal black spruce wildfire chronosequence. – Agric. For. Meteorol. 149(1): 187–204. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.08.001

43. *Damgaard C.* 2012. Trend analyses of hierarchical pin-point cover data. – Ecology. 93(6): 1269–1274. https://doi.org/10.1890/11-1499.1

44. *Barkaoui K., Bernard-Verdier M., Navas M.L.* 2013. Questioning the Reliability of the Point Intercept Method for Assessing Community Functional Structure in Low-Productive and Highly Diverse Mediterranean Grasslands. – Folia Geobot. 48(3): 393–414. https://doi.org/10.1007/s12224-013-9172-2

45. *Cole D.N., Bayfiel N.G.* 1993. Recreational trampling of vegetation: standard experimental procedures. – Biol. Conserv. 63(3): 209–215. https://doi.org/10.1016/0006-3207(93)90714-C

46. *Piscová V., Kanka R., Krajcí J.P., Barancok P.* 2011. Short-term trampling experiments in the *Juncetum trifidi* Krajina 1933 association. – Ekológia (Bratislava). 30(3): 322–333. https://doi.org/10.4149/ekol_2011_03_322

47. *Ярмишко В.Т.* 2012. Состояние и продуктивность растений напочвенного покрова сосновых лесов в условиях аэротехногенного загрязнения на Европейском Севере. – Успехи современного естествознания. 11: 18–21. https://s.natural-sciences.ru/pdf/2012/11-1/3.pdf

48. *Руководство* по комплексному мониторингу. 2013. Перевод с англ. М., ФГБУ "ИГКЭ Росгидромета и РАН". 153 с. http://downloads.igce.ru/publications/ICP_IM_Manuals/Manual_rus_04122013.pdf

49. *Дохман Г.И., Пороховник П.Е.* 1953. Из истории русской фитоценологии. – Бот. журн. 38 (2): 300–306.

50. *Трасс Х.Х.* 1976. Геоботаника. История и современные тенденции развития. Л. 252 с.

51. *Pechanec J.F., Pickford G.D.* 1937. Weight estimate method for the determination of range or pasture production. – J. Am. Soc. Agron. 29(11): 894–904. https://doi.org/10.2134/agronj1937.00021962002900110003x

52. *Ярошенко П.Д.* 1967. К методике определения веса травостоев по высоте основной массы и проективному покрытию. – Бюлл. МОИП. Отд. биол. 72(4): 120–123.

53. *Carpenter A.T., West N.E.* 1987. Validating the reference unit method of aboveground phytomass estimation on shrubs and herbs. – Vegetatio 72(2): 75–79. https://doi.org/10.1007/bf00044836

54. *Tonteri T.* 1990. Inter-observer variation in forest vegetation cover assessments. – Silva Fennica. 1990. 4(2): 189–196. https://doi.org/10.14214/sf.a15575

55. *Klimeš L.* 2003. Scale-dependent variation in visual estimates of grassland plant cover. – J. Veg. Sci. 14(6): 815–821. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02214.x

56. *Muukkonen P., Mäkipää R., Laiho., Mikkinen K., Vasander H., Finer L.* 2006. Relationship between Biomass and Percentage Cover in Understorey Vegetation of Boreal Coniferous Forests. – Silva Fenn. 40(2): 231–245. https://doi.org/10.14214/sf.340

57. *Vittoz P., Guisan A.* 2007. How reliable is the monitoring of permanent vegetation plots? A test with multiple observers. – J. Veg. Sci. 18(3): 413–422. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2007.tb02553.x

58. *Wiegert R.G.* 1962. The selection of an optimum quadrat size for sampling the standing crop of grasses and forbs. – Ecology. 43(1): 125–129. https://doi.org/10.2307/1932047

59. *Doniță N.* 1972. Zahl und Größe der Probeflächen bei der direkten Bestimmung der Krautschicht-Biomasse im Walde. — Oecolog. Plantar. 7: 85–94.

60. *Белоногова Т.В.* 1973. Биологическая продуктивность нижних ярусов растительности сосновых фитоценозов Карелии: Автореферат дисс. ... канд. биол. наук. Петрозаводск. 23 с.

61. *Дымина Г.Л.* 1976. Значение размера и формы учетных площадок при определении продукции травостоя в луговых сообществах. – Экология. 3: 34–39.

62. *Ahmed J., Bonham C.D., Laycock W.A.* 1983. Comparison of techniques used for adjusting biomass estimates by double sampling. – J. Range Manage. 36(2): 217–221.
https://doi.org/10.2307/3898166

63. *Hormay A.L.* 1949. Getting better records of vegetation changes with the line interception method. – J. Range Manage. 2(2): 67–69.
https://doi.org/10.2307/3894545

64. *Борисова И.В., Попова Т.А.* 1966. Значение исследования биолого-морфологических особенностей растений для разработки методики учета их биологической продуктивности. – Бот. журн. 51(9): 1289–1292.
http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=2558&rid=pdf_0002549

65. *Hermy M.* 1988. Accuracy of visual cover assessments in predicting standing crop and environmental correlation in deciduous forests. – Vegetatio. 75(1–2): 57–64.
https://doi.org/10.1007/BF00044626

66. *Bolte A., Anders S., Roloff A.* 2002. Schätzmodelle zum oberirdischen Vorrat der Waldbodenflora an Trockensubstanz, Kohlenstoff und Makronährelementen [Assessment models for dry weight and storage of carbon and nutrients in forest ground vegetation]. – Allg. Forst Jagdztg. 173(4): 57–66.
https://www.sauerlaender-verlag.com/download/afjz-2002-heft-4/?wpdmdl=1819 (In German)

67. *Игнатьева Л.А.* 1965. Определение продуктивности надземной части травостоя березово-осинового леса. — Известия СО АН СССР. Серия биол.-мед. наук. 8(2): 62–67.

68. *Храмцова Н.Ф.* 1974. Статистический метод определения биопродуктивности травяных ценозов. – Бот. журн. 59(6): 815 – 825.
http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=3905&rid=pdf_0003896

69. *Раменский Л.Г.* 1966. Прямые и комбинированные методы количественного учета растительного покрова. – В сб.: Труды МОИП. Т. 27. С. 17–45.

70. *Раменский Л.Г.* 1971. Избранные работы. Проблемы и методы изучения растительного покрова. Л. 334 с.

71. *Olson B.E., Walander R.T., Beaver J.M.* 2000. Comparing nondestructive measures of forage structure and phytomass. – Can. J. Plant Sci. 80(3): 565–573.
https://doi.org/10.4141/P99-073

72. *Hui-Qing Zeng, Qi-Jing Liu, Zong-Wei Feng, Ze-Qing Ma.* 2010. Biomass equations for four shrub species in subtropical China. – J. For. Res- Jpn. 15(2): 83–90.
https://doi.org/10.1007/s10310-009-0150-8

73. *Ипатов В.С.* 1962. О корреляции между проективным покрытием и весом травянистых растений. – Бот. журн. 47(7): 991–992.
http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=1466&rid=pdf_0001457

74. *Alaback P.B.* 1986. Biomass regression equations for understory plants in coastal Alaska: effects of species and sampling design on estimates. – Northwest Sci. 60(2): 90–103.

75. *Gilliam F.S., Turrill N.L.* 1993. Herbaceous layer cover and biomass in a young versus a mature stand of a central Appalachian hardwood forest. – B. Torrey Bot. Club. 120(4): 445–450.
https://doi.org/10.2307/2996749

76. *Röttgermann M., Steinlein T., Beyschlag W., Dietz H.* 2000. Linear relationships between aboveground biomass and plant cover in low open herbaceous vegetation. – J. Veg. Sci. 11(1): 145–148.
https://doi.org/10.2307/3236786

77. *Бузук Г.Н.* 2013. Характер связей между проективным покрытием и урожайностью побегов брусники в сосняке зеленомошном. – Вестник фармации. 4(62): 44–49.

78. *Kirmse R.D., Norton B.E.* 1985. Comparison of the reference unit method and dimensional analysis methods for two large shrubby species in the Caatinga woodlands. – J. Range Manage. 38(5): 425–428.
https://doi.org/10.2307/3899714

79. *Jonasson S.* 1988. Evaluation of the point intercept method for the estimation of plant biomass. – Oikos. 52(1): 101–106.
https://doi.org/10.2307/3565988

80. *Bråthen K.A., Hagberg O.* 2004. More efficient estimation of plant biomass. – J. Veg. Sci. 15(5): 653–660.
https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02307.x

81. *Руденко Е.В., Бузук Г.Н., Кузмичева Н.В.* 2016. Нелинейный характер зависимости между фитомассой и проективным покрытием ландыша майского в различных местообитаниях. – Вестник фармации. 4(74): 25–30.

82. *Дружинина Н.П.* 1968. Опыт применения статистических методов обработки при определении продуктивности надземной части травостоя. – Бот. журн. 58(8). 1138–1144.

83. *Winkworth R.E., Perry R.A., Rossetti C.O.* 1962. A comparison of methods of estimating plant cover in an arid grassland community. – J. Range Manage. 15(4): 194–196.
https://doi.org/10.2307/3895247

84. *Krajina V.J.* 1933. Die Pflanzengesellschaften des Mlynica-Tales in den Vysoke Tatry (Hohe Tatra). Mit besonderer Beriicksichtigung des ikologischen Verhaltnisse. – Bot. Centralbl. Beih. Abt. II, 50: 774–957, 51: 1–224.
85. *Wilson J.B.* 2011. Cover plus: ways of measuring plant canopies and the terms used for them. – J. Veg. Sci. 22(2): 197–206. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2010.01238.x
86. *Бузук Г.Н., Созинов О.В.* 2014. Методы учета проективного покрытия растений: сравнительная оценка с использованием фотоплощадок. – Известия Самарского научного центра РАН. 16(5): 1644–1649. http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2014/2014_5_1644_1649.pdf.
87. *Созинов О.В., Бузук Г.Н.* 2014. Оптимизация геоботанического метода уколов в условиях масштабирования площади учета. – Научные ведомости БелГУ. Серия Естественные науки. 28(17 (188)): 64–69. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22411753
88. *Федоров Н.И., Жигунова С.Н., Михайленко О.И., Самойлова Л.Ю.* 2010. Методика оценки продуктивности лекарственных видов в растительных сообществах, описанных в системе единиц эколого-флористической классификации Браун-Бланке. – Известия Самарского научного центра РАН. 12(1(3)): 846–849. http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2010/2010_1_846_849.pdf
89. *Kubiček F.* 1976. Growth and dewelopment of *Asperula odorata* L. in an oak-hornbeaum ecosystem. – Biologia. 31(1): 41–53.
90. *Walter C.A., Burnham M.B., Gilliam F.S., Peterjohn W.T.* 2015. A reference-based approach for estimating leaf area and cover in the forest herbaceous layer. – Environ. Monit. Assess. 187(10): 657. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4878-7
91. *Kercher S.M., Frieswyk C.B., Zedler J.B.* 2003. Effects of sampling teams and estimation methods on the assessment of plant cover. – J. Veg. Sci. 14(6): 899–906. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02223.x
92. *Drew W.B.* 1944. Studies on the use of the point-quadrat method of botanical analysis of mixed pasture vegetation. – J. Agric. Res. 69(7): 289–298.
93. *Грейг-Смит П.* 1967. Количественная экология растений. Перевод с англ. М. 359 с.
94. *Bonham C.D., Clark D.L.* 2005. Quantification of plant cover estimates. – Grassl. Sci. 51(2): 129–137. https://doi.org/10.1111/j.1744-697X.2005.00018.x
95. *Hanley T.A.* 1978. A comparison of the line-interception and quadrat estimation methods of determining shrub canopy coverage. – J. Range Manage. 31(1): 60–62. https://doi.org/10.2307/3897638
96. *Горин В.И., Савкина С.Н.* 1990. К вопросу о корреляции между проективным покрытием и массой травянистых растений. – Бот. журн. 75(1): 111–115.
97. *Dietz H., Steinlein T.* 1996. Determination of plant species cover by means of image analysis. – J. Veg. Sci. 7(1): 131–136. https://doi.org/10.2307/3236426
98. *Floyd D.A., Anderson J.E.* 1987. A comparison of three methods for estimating plant cover. – J. Ecol. 75(1): 221–228. https://doi.org/10.2307/2260547
99. *Ganguli A.C., Vermeire L.T., Mitchell R.B., Wallace M.C.* 2000. Comparison of four nondestructive techniques for estimating standing crop in shortgrass plains. – Agron. J. 92(6): 1211–1215. https://doi.org/10.2134/agronj2000.9261211x
100. *Johnson P.S., Johnson C.L., West N.E.* 1988. Estimation of phytomass for ungrazed crested wheatgrass plants using allometric equations. – J. Range Manage. 41(5): 421–425. https://doi.org/10.2307/3899582
101. *Frank D.A., McNaughton S.J.* 1990. Aboveground biomass estimation with the canopy intercept method: a plant growth form caveat. – Oikos 57: 57–90. https://doi.org/10.2307/3565736
102. *Kosykh N.P., Koronatova N.G., Naumova N., Titlyanova A.A.* 2008. Above- and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems of Western Siberia. – Wetl. Ecol. Manag. 16(2): 139–153. https://doi.org/10.1007/s11273-007-9061-7
103. *Кильдюшевский И.Д.* 1970. Опыт определения массы мха *Thuidium recognitum* (HEDW.) LINDB. по его высоте и проективному покрытию. – Бот. журн. 55 (9): 1316–1319. http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=2977&rid=pdf_0002968
104. *Успенская И.М.* 1966. Определение массы мохового покрова в биогеоценозах широколиственно-еловых лесов в связи с их парцеллярной структурой. – Бот. журн. 51(12): 1706–1708. http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=2619&rid=pdf_0002610
105. *Vanha-Majamaa I., Salemaa M., Tuominen S., Mikkola K.* 2000. Digitized photographs in vegetation analysis – a comparison of cover estimates. – Appl. Veg. Sci. 3(1): 89-94. https://doi.org/10.2307/1478922

106. *Richardson M.D., Karcher D.E., Purcell L.C.* 2001. Quantifying Turfgrass Cover Using Digital Image Analysis. – Crop Sci. 41(6): 1884–1888.
https://doi.org/10.2135/cropsci2001.1884

107. *Tomasel F.G., Paruelo J.M., Abras G., Ballarin V., Moler E.* 2001. A chromaticity-based technique for estimation of above-ground plant biomass. – Appl. Veg. Sci. 4(2): 207–212.
https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2001.tb00489.x

108. *Seefeldt S.S., Booth D.T.* 2006. Measuring plant cover in sagebrush steppe rangelands: A comparison of methods. – Environ. Manage. 37(5): 703–711.
https://doi.org/10.1007/s00267-005-0016-6

109. *Booth D.T., Cox S.E., Meikle T., Zuuring H.R.* 2008. Ground-cover measurements: assessing correlation among aerial and ground-based methods. – Environ. manage. 42(6): 1091–1100.
https://doi.org/10.1007/s00267-008-9110-x

110. *Gallegos Torell Å., Glimskär A.* 2009. Computer-aided calibration for visual estimation of vegetation cover. – J. Veg. Sci. 20(6): 973–983.
https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01111.x

111. *Weltz M.A., Ritchie J.C., Fox H.D.* 1994. Comparison of laser and field measurements of vegetation height and canopy cover. – Water Resour. Res. 30(5): 1311–1319.
https://doi.org/10.1029/93WR03067

112. *Kellomäki S.* On the Relation between Biomass and Coverage in Ground Vegetation of Forest Stand. – Silva Fenn. 8(1): 20–46.
https://doi.org/10.14214/sf.a14739

113. *Muukkonen P., Mäkipää R.* 2006. Empirical biomass models of understorey vegetation in boreal forests according to stand and site attributes. – Boreal Environ. Res. 11: 355–369.
http://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber11/ber11-355.pdf

114. *StatView:* StatView reference. 1999. Cary, NC, USA. 528 p.

115. *Aune E.I., Kubíček F., Moen A., Øien D.-I.* 1996. Biomass studies in semi-natural ecosystems influenced by scything at the Sølendet Nature Reserve, Central Norway. III. Tall herb birch forest. – Ekológia (Bratislava). 15(3): 307–320.

116. *Работнов Т.А.* 1963. К методике проведения опытов на лугах. – Вестник сельскохозяйственной науки. 6: 56–68.

117. *Малиновский К.А., Работнов Т.А.* 1974. Изучение луговых биогеоценозов. – В кн.: Программа и методика биогеоценологических исследований. М.: С. 318–331.

118. *Жулидова Т.В., Кашин А.С.* 2006. Некоторые морфологические особенности и ресурсный потенциал *Helichrysum arenarium* (L.) Moench в связи с условиями произрастания. – Бюлл. Бот. сада Саратовского Гос. Университета. С. 98–104.
https://bbs.sgu.ru/system/files_force/2017/03/ilovepdf_merged-10-98-104.pdf?download=1

119. *Tausch R.J., Tueller P.T.* 1990. Foliage biomass and cover relationships between tree- and shrub-dominated communities in pinyon-juniper woodlands. – Great Basin Naturalist. 50(2): 121–134.
https://www.jstor.org/stable/41712584

120. *Ипометс М.А.* 1976. Продуктивность сфагнового покрова на примере Гусиного болота. – В сб.: Труды Печоро-Илычского Государственного заповедника. Вып. 13. Сыктывкар. С. 40–57.

121. *Мазная Е.А.* 2001. Влияние промышленных выбросов на состояние и структуру ценопопуляций *Vaccinium myrtillus* L. и V. *Vitis-idaea* L. (Кольский полуостров). – Раст. ресурсы. 37(3): 3–12.

122. *Poschlod P. Kleyer M., Jackel A.K., Dannemann A., Tackenberg O.* 2003. BIOPOP—a database of plant traits and internet application for nature conservation. – Folia Geobot. 38(3): 263–271.
https://doi.org/10.1007/BF02803198

123. *Joubert A.J., Myburgh W.J.* 2014. A comparison of three dry matter forage production methods used in South Africa. – Int. J. Ecology. Article ID 314939
https://doi.org/10.1155/2014/314939

124. *Уткин А.И., Ермолова Л.С., Уткина И.А.* 2008. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование. М. 292 с.

125. *Жукова Л.А.* 1998. Методы оценки внутрипопуляционного биоразнообразия травянистых растений в лесных экосистемах. – В сб.: Современные методы учета и рационального использования лесных ресурсов: Материалы докладов региональной науч.-практ. конф. Йошкар-Ола. С. 71–73.

126. *Tackenberg O.* 2007. A new method for non-destructive measurement of biomass, growth rates, vertical biomass distribution and dry matter content based on digital image analysis. – Ann. Bot. 99(4): 777–783.
https://doi.org/10.1093/aob/mcm009

127. *Лукина Н.В., Исаев А.С., Крышень А.М., Онучин А.А., Сирин А.А., Гагарин Ю.Н., Барталев С.А.* 2015. Приоритетные направления развития лесной науки как основы устойчивого управления лесами. – Лесоведение. (4): 243–254.
https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23906214

# Approaches to the Assessment of the Forest Herbaceous Layer Phytomass (Methods Review)

**L. S. Ermolova***

*Institute of Forest Science RAS, Moscow Region, vlg. Uspenskoe, Russia*

**e-mail: ls_ermolova@list.ru*

**Abstract**—This paper overviews the methods for assessment of forest herbaceous layer phytomass and grass production, as the most informative bioindicators of the environmental conditions, utilization of habitat resources use, and their role in the forest community functioning. The summary and application of these methods in ecological and resource-related problems solving is given. The process of improving classical methods using modern devices and technologies is shown. The study justifies the need for and possible ways to improve the methods for assessing phytomass and grass production in the context of the new areas of biological science developmnet: conservation of biodiversity, bioindication of habitat features, assessment and monitoring of forest resource potential at different spatial levels. Particular attention is paid to the development of the method of model plants, which, after establishing relevant regulatory framework, allows prompt non-distructive assessment of the forest herbaceous layer phytomass.

*Keywords:* biological productivity, methods for assessing phytomass, grass cover, forest phytocenoses, method of model plants

## ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to A.A. Maslov, Doctor of Biology, and Y.I. Gulbe, Candidate of Biology, for perusing the article, and for their valuable comments and advice. The work was performed within the framework of the state assignment AAAA-A19-119053090074-7.

## REFERENCES

1. *Brown D.* 1957. [Methods of Surveying and Measuring Vegetation]. Transl. from Engl. Moscow. 316 p. (In Russian)
2. *Vasilevich V.I.* 1969. [Statistical methods in geobotany]. Leningrad. 232 p. (In Russian)
3. *Newbould P.J.* 1967. Methods for estimating the primary production of forests. International Biological Programme. London.
4. *Rodin L.Ye., Remezov N.P., Bazilevich N.I.* 1968. [Guidelines for the study of the dynamics of biological circulation in phytocenoses]. Leningrad. 143 p. (In Russian)
5. *Utkin A.I.* 1975. [Biological Productivity of Forests: Research Methods and Results. Results of Science and Technology]. – In: [Forest Science and Forestry]. 4: 9–189. Moscow. (In Russian)
6. [*Forest* community research methods]. 2002. St. Petersburg. 240 p. (In Russian)
7. *Usoltsev V.A., Zalesov S.V.* 2005. [Methods for determining the biological productivity of plantations]. Ekaterinburg. 147 p. (In Russian)
8. *Sochava V.B., Lipatova V.V., Gorshkova A.A.* 1962. A tentative study of the complete productivity of the supperterranean part of the herbage cover. – Botanicheskii Zhurnal. 47(4): 473–484. http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=1397&rid=pdf_0001388 (In Russian)
9. *Brechtl J., Kubíček F.* 1968. Príspevok k poznaniu primárnej produkcie bylinnej vrstvy lesných spoločenstiev [Contribution to the knowledge of the primary production of the herbaceous layer of forest communities]. – Biológia (Bratislava). 23(4): 305–316. (In Slovak)
10. *Kubiček F., Brechtl J.* 1970. Production and phenology of the herb layer in an Oak-Hornbeam forest. – Biológia (Bratislava). 25(10): 651–66.
11. *Vašíček F.* 1985. Structure and biomass of the herb layer. – Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology. 15(A): 171–238. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-99566-7.50010-X
12. *Höhne H.* 1962. Vergleichende Untersuchungen über Mineralstoff und Stickstoffgehalt sowie Troskensubstanzproduction von Waldbodenpflanzen. [Comparative studies on mineral and nitrogen content as well as dry substance production of forest soil plants]. – Arch. Forstwesen. 11(10): 1085–1141. (In German)
13. *Kurbanov E.A.* 2002. [The carbon budget of pine ecosystems of the Volga-Vyatka region]. Yoshkar-Ola. 298 p. (In Russian)
14. *Vakurov A.D., Polyakova A.F.* 1982 [Cycle of nitrogen and ash elements in low-productive spruce forests of the northern taiga]. – In: [The cycle of chemicals in the forest]. Moscow. P. 20–43. (In Russian)

15. *Ermolova L.S.* 1986. [Ecological-phytocenotic groups and phytomass of grass cover]. – In: [Vertical-fractional distribution of phytomass in forests]. Moscow. P. 110–117. (In Russian)

16. *Karmanova I.V.* 1983. [Relationships between the individual's life form and productivity]. – Zhurnal obshchey biologii: 44(4): 461–467. (In Russian)

17. *Tereshenkova I.A.* 1962. [The effect of the ground vegetation in spruce forests on the litter stock and its nitrogen, phosphorus, and potassium content]. – Botanicheskii Zhurnal. 47(7): 995–1000. http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=1468&rid=pdf_0001459 (In Russian)

18. *Kiselyova N.K., Karpachtvskii L.O.* 1971. [Contribution of the herbaceous layer to the the oak-spruce forest nutrient cycling]. – In: [Biological productivity and turnover of chemical elements in plant communities]. Leningrad. P. 235–240. (In Russian)

19. *Os'kina N.V., Ermolova L.S.* 1982. [Nitrogen content in soils, aboveground phytomass and annual production of gray alder forests]. – In: [Biological productivity of the Volga forests]. Moscow. C. 142–146. (In Russian)

20. *Guo Q., Rundel P.W.* 1997. Measuring dominance and diversity in ecological communities: choosing the right variables. – J. Veg. Sci. 8(3): 405–408. https://doi.org/10.2307/3237331

21. *Nilsson M.-Ch., Wardle D.A.* 2005. Understory vegetation as a forest ecosystem driver: evidence from the northern Swedish boreal forest. – Front. Ecol. Environ. 3(8): 421–428. https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0421:UVAAFE]2.0.CO;2

22. *Maksimova V.F., Golubeva E.I.* 2008. Cenotic role of species populations of herbaceous layer in broadleaved-pine forests of the Eastern Sikhote-Alin Mountains. – Vestnik Mosk. Universiteta. Seriya 5, Geografiya. 4: 53–57. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11668449 (In Russian)

23. *Telesnina V.M.* 2015. Postagrogenic dynamics of vegetation and soil properties during demutational succession in south taiga. – Lesovedeniye. 4: 293–306. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23906220 (In Russian)

24. *Bolte A.* 2006. Biomass- und Elementforräte der Bodenvegetation auf Flächen des forstlichen Umveltmonitorings in Rheinald-Pfalz (BZE, EU Level II) [Biomass and elemental forums of the ground vegetation on areas of forest environment monitoring in Rheinald-Pfalz (BZE, EU Level II).] – In: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B. Bd. 72. 80 p.

25. *Vakurov A.D., Polyakova A.F.* 1982 [Cycle of nitrogen and ash elements in a 35-year-old aspen]. – In: [The cycling of matter in the forest]. Moscow. P. 44–54. (In Russian)

26. *Bolte A., Lambertz B., Steinmeyer A., Kallwelt K., Meesenburg H.* 2004. Zur Funktion der Bodenvegetation im Nährstoffhaushalt von Wäldern – Studien auf Dauersbeobachtungsflächen des EU Level II-Programms in Norddeutschland. [On the function of soil vegetation in the nutrient balance of forests – studies on permanent observation areas of the EU Level II program in Northern Germany]. – Forstarchiv. 75: 207–219.

27. *Gilliam F.S.* 2007. The Ecological Significance of the Herbaceous Layer in Temperate Forest Ecosystems. – BioScience. 57(10): 845–858. https://doi.org/10.1641/B571007

28. *Klink U., Fröhlich D.* 2009. Application of the phytomass and elemental stock model "PhytoCalc" under clear-cut conditions. – Allg. Forst Jagdztg. 180: 15–21. https://www.sauerlaender-verlag.com/download/02-klinck/?wpdmdl=1330

29. *Heinrichs S., Bernchardt-Römermann M., Schmidt W.* 2010. The estimation of aboveground biomass and nutrient pools of understorey plants in closed Norway spruce forests and on clearcuts. – Eur. J. For. Res. 129(4): 613–624. https://doi.org/10.1007/s10342-010-0362-7

30. *Hughes M.K.* 1970. Ground vegetation and forest litter production. – In.: Methods of study in soil ecology: Proceedings of the Paris symposium organized by UNESCO and the International Biological Programme. UNESCO, Paris. P. 145–150. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000015320

31. *Dymov A.A., Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V., Rakina D.A.* 2012. Tree waste in an aboriginal spruce forest and mixed stands. – Lesnoy zhurnal (Russian forestry journal). 48(3): 7–18. (In Russian) http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/e87/gkuj1.pdf

32. *Popova E.P., Shugaley I.S.* 2000 [The formation and biological activity of litter under coeval crops of the main forest-forming species of Siberia.] – Lesovedeniye. 6: 32–38. (In Russian)

33. *Macfarlane C., Ogden G.N.* 2012. Automated estimation of foliage cover in forest understorey from digital nadir images. – Methods Ecol. Evol. 3(2): 405–415. https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00151.x

34. *Ermolova L.S., Gulbe A.Ya., Lunkova N.F.* 2017. The role of living ground cover in the forest: the views of G.F. Morozov and the current state of the issue. – In: [Contemporary problems of botany and nature protection: Sci. articles of In-

tern. scientific-practical conf., dedicated to the 150th anniversary of G.F. Morozov]. Simferopol. P. 31–37. (In Russian)

35. *Bazilevich N.I., Puzachenko Y.G.* 1980. [Organization of observations and research under the geosystem monitoring in biosphere reserves program]. – Izvestiya AN SSSR. Ser. geograf. 2: 120–129. (In Russian)
36. *Utkin A.I., Rozhdestvensky S.G., Gulbe Y.I., Kaplina N.F.* 1988. [Productive invariance of the forest stands]. – Lesovedeniye. 2: 12–23. (In Russian)
37. *Pieper R.D.* 1988. Rangeland vegetation productivity and biomass. – In: Vegetation science applications for rangeland analysis and management. Handbook of vegetation science, vol 14. Dordrecht: P. 449–467. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3085-8_18
38. *Chiarucci A., Wilson J.B., Anderson B.J., De Dominicis V.* 1999. Cover *versus* biomass as an estimate of species abundance: does it make a difference to the conclusions? – J. Veg. Sci. 10(1): 35–42. https://doi.org/10.2307/3237158
39. *Peet R., Wentworth T.R., White P.S.* 1998. A flexible, multipurpose method for recording vegetation composition and structure. – Castanea. 63(3): 262–274.
40. *Schulze L.-M., Bolte A., Schmidt W., Eichhorn J.* 2009. Phytomfss, Litter and Net Primary Production of Herbaceous Layer. – In: Functioning and Management of European Beech Ecosystems. Berlin, Heidelberg: 155–181. https://doi.org/10.1007/b82392_11
41. *Dengler J.* 2009. A flexible multi-scale approach for standardised recording of plant species richness patterns. – Ecol. Indic. 9(6): 1169–1178. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.02
42. *Serbin Sh.P., Gower S.T., Ahl D.E.* 2009. Canopy dynamics and phenology of a boreal black spruce wildfire chronosequence. – Agric. For. Meteorol. 149(1): 187–204. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.08.001
43. *Damgaard C.* 2012. Trend analyses of hierarchical pin-point cover data. – Ecology. 93(6): 1269–1274. https://doi.org/10.1890/11-1499.1
44. *Barkaoui K., Bernard-Verdier M., Navas M.L.* 2013. Questioning the Reliability of the Point Intercept Method for Assessing Community Functional Structure in Low-Productive and Highly Diverse Mediterranean Grasslands. – Folia Geobot. 48(3): 393–414. https://doi.org/10.1007/s12224-013-9172-2
45. *Cole D.N., Bayfiel N.G.* 1993. Recreational trampling of vegetation: standard experimental procedures. Biol. Conserv. 63(3): 209–215. https://doi.org/10.1016/0006-3207(93)90714-C
46. *Piscová V., Kanka R., Krajcí J.P., Barancok P.* 2011. Short-term trampling experiments in the *Juncetum trifidi* Krajina 1933 association. – Ekológia (Bratislava). 30(3): 322–333. https://doi.org/10.4149/ekol_2011_03_322
47. *Yarmishko V.T.* 2012. Plant state and productivity of the overground in pine forests under aeroindustrial contamination on European North. – Advances in current natural sciences. 11:18–21. https://s.natural-sciences.ru/pdf/2012/11-1/3.pdf (In Russian)
48. [*Manual* for Integrated Monitoring. International Cooperative Progranime on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems Vers. 04.12.2013]. Transl. from Engl. 2013. Moscow. 153 p. http://downloads.igce.ru/publications/ICP_IM_Manuals/Manual_rus_04122013.pdf (In Russian)
49. *Dokhman G.I., Porokhovnik P.E.* 1953. [Excerpts on the history of Russian phytocenology]. – Botanicheskii Zhurnal. 38 (2): 300–306. (In Russian)
50. *Trass Kh.Kh.* 1976. [Geobotany. History and modern development trends]. Leningrad. 252 p. (In Russian)
51. *Pechanec J.F., Pickford G.D.* 1937. A comparison of some methods used in determining percentage utilization of range grasses. – J. Agr. Res. 54: 753–765. https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19371404100
52. *Yaroschenko P.D.* 1967. On the methods for the determination of yields of swards by the height and cover. – Byulletin of Moscow society of Naturakists, Biological series. 72(4): 120–123. http://herba.msu.ru/russian/journals/bmsn/archive/moip_1967_072_4.djvu (In Russian)
53. *Carpenter A.T., West N.E.* 1987. Validating the reference unit method of aboveground phytomass estimation on shrubs and herbs. – Vegetatio 72(2): 75–79. https://doi.org/10.1007/bf00044836
54. *Tonteri T.* 1990. Inter-observer variation in forest vegetation cover assessments. – Silva Fennica. 1990. 4(2): 189–196. https://doi.org/10.14214/sf.a15575
55. *Klimeš L.* 2003. Scale-dependent variation in visual estimates of grassland plant cover. – J. Veg. Sci. 14(6): 815–821. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02214.x

56. *Muukkonen P., Mäkipää R., Laiho., Mikkinen K., Vasander H., Finer L.* 2006. Relationship between Biomass and Percentage Cover in Understorey Vegetation of Boreal Coniferous Forests. – Silva Fenn. 40(2): 231–245. https://doi.org/10.14214/sf.340

57. *Vittoz P., Guisan A.* 2007. How reliable is the monitoring of permanent vegetation plots? A test with multiple observers. – J. Veg. Sci. 18(3): 413–422. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2007.tb02553.x

58. *Wiegert R.G.* 1962. The selection of an optimum quadrat size for sampling the standing crop of grasses and forbs. – Ecology. 43(1): 125–129. https://doi.org/10.2307/1932047

59. *Donită N.* 1972. Zahl und Größe der Probeflächen bei der direkten Bestimmung der Krautschicht-Biomasse im Walde. – Oecolog. Plantar. 7: 85–94.

60. *Belonogova T.V.* 1973. [Biological productivity of the lower layers of vegetation of pine phytocenoses in Karelia: Abst. ... Diss. Cand. (Biology) Sci.]. Petrozavodsk. 23 p. (In Russian)

61. *Dymina G.L.* 1976. The value of the size and shape of the registration sites in determining the production of grass in meadow communities. – Ekologiya. 3: 34–39. (In Russian)

62. *Ahmed J., Bonham C.D., Laycock W.A.* 1983. Comparison of techniques used for adjusting biomass estimates by double sampling. – J. Range Manage. 36(2): 217–221. https://doi.org/10.2307/3898166

63. *Hormay A.L.* 1949. Getting better records of vegetation changes with the line interception method. – J. Range Manage. 2(2): 67–69. https://doi.org/10.2307/3894545

64. *Borisova I.V., Popova T.A.* 1966. The significance of investigation of specific biomorphological features of plants for the elaboration of the methods for estimation of their biological productivity. – Botanicheskii Zhurnal. 51(9): 1289–1292. http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=2558&rid=pdf_0002549 (In Russian).

65. *Hermy M.* 1988. Accuracy of visual cover assessments in predicting standing crop and environmental correlation in deciduous forests. – Vegetatio. 75(1–2): 57–64. https://doi.org/10.1007/BF00044626

66. *Bolte A., Anders S., Roloff A.* 2002. Schätzmodelle zum oberirdischen Vorrat der Waldbodenflora an Trockensubstanz-, Kohlenstoff und Makronährelementen [Assessment models for dry weight and storage of carbon and nutrients in forest ground vegetation]. – Allg. Forst Jagdztg. 173(4): 57–66. https://www.sauerlaender-verlag.com/download/afjz-2002-heft-4/?wpdmdl=1819 (In German)

67. *Ignatyeva L.A.* 1965. Determination of the full productivity of the aboveground part of the herbage of a birch-aspen forest. – Izvestiya Sib. otd. Akad. Nauk SSSR. Ser. Biology and Medicine. 8(2): 62–67. (In Russian)

68. *Khramtsova N.F.* 1974. A statistic method of determination of grass coenoses the bioproductivity. – Botanicheskii Zhurnal. 59(6): 815–825. http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=3905&rid=pdf_0003896 (In Russian)

69. *Ramenskii L.G.* 1966. [Direct and combined methods for quantifying land cover]. – Trudy MOIP. 27: 17–45. (In Russian)

70. *Ramenckii L.G.* 1971. [Selected works. Problems and methods of studying land cover]. Leningrad. 334 c. (In Russian)

71. *Olson B.E., Walander R.T., Beaver J.M.* 2000. Comparing nondestructive measures of forage structure and phytomass. – Can. J. Plant Sci. 80(3): 565–573. https://doi.org/10.4141/P99-073

72. *Zeng H.-Q., Liu Q.-J., Feng Z.-W., Ma Z.-Q.* 2010. Biomass equations for four shrub species in subtropical China. – J. For Res. 15(2): 83–90. 15: 83–90. https://doi.org/10.1007/s10310-009-0150-8

73. *Ipatov V.S.* 1962. On the correlation between the projective cover and the weight of herbaceous plants. – Botanicheskii Zhurnal. 47(7): 991–992. http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=1466&rid=pdf_0001457 (In Russian)

74. *Alaback P.B.* 1986. Biomass regression equations for understory plants in coastal Alaska: effects of species and sampling design on estimates. – Northwest Sci. 60(2): 90–103.

75. *Gilliam F.S., Turrill N.L.* 1993. Herbaceous layer cover and biomass in a young versus a mature stand of a central Appalachian hardwood forest. – B. Torrey Bot. Club. 120(4): 445–450. https://doi.org/10.2307/2996749

76. *Röttgermann M., Steinlein T., Beyschlag W., Dietz H.* 2000. Linear relationships between aboveground biomass and plant cover in low open herbaceous vegetation. – J. Veg. Sci. 11(1): 145–148. https://doi.org/10.2307/3236786

77. *Buzuk G.N.* 2013. The nature of the links between the projective covering and the yield of shoots of cowberries in the moss green pine forest. – Vestnik farmatsii. 4(62): 44–49. (In Russian)

78. *Kirmse R.D., Norton B.E.* 1985. Comparison of the reference unit method and dimensional analysis methods for two large shrubby species in the Caatinga woodlands. –J. Range Manage. 38(5): 425–428. https://doi.org/10.2307/3899714

79. *Jonasson S.* 1988. Evaluation of the point intercept method for the estimation of plant biomass. – Oikos. 52(1): 101–106. https://doi.org/10.2307/3565988

80. *Bråthen K.A., Hagberg O.* 2004. More efficient estimation of plant biomass. – J. Veg. Sci. 15(5): 653–660. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02307.x

81. *Rudenko E.V., Buzuk G.N., Kuzmicheva N.V.* 2016. Non-linear format of the dependency between phytomass and projective cover of *Convallaria majalis* in different environmental conditions. – Vestnik farmatsii. 4(74): 25–30. (In Russian)

82. *Druzhinina N.P.* 1968. [The experience of using statistical processing methods in determining the productivity of the aerial part of the grass stand]. – Botanicheskii Zhurnal. 58(8). 1138–1144. (In Russian)

83. *Winkworth R.E., Perry R.A., Rossetti C.O.* 1962. A comparison of methods of estimating plant cover in an arid grassland community. – J. Range Manage. 15(4): 194–196. https://doi.org/10.2307/3895247

84. *Krajina V.J.* 1933. Die Pflanzengesellschaften des Mlynica-Tales in den Vysoke Tatry (Hohe Tatra). Mit besonderer Beriicksichtigung des ikologischen Verhaltnisse. – Bot. Centralbl. Beih. Abt. II. 50: 774-957; 51: 1–224.

85. *Wilson J.B.* 2011. Cover plus: ways of measuring plant canopies and the terms used for them. – J. Veg. Sci. 22(2): 197–206. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2010.01238.x

86. *Buzuk G.N., Sozinov O.V.* 2014. Accounting methods of plants projective cover: comparative evaluation using phot sites. – Izvestia of Samara Scientific Center RAS. 16(5): 1644–1649. http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2014/2014_5_1644_1649.pdf (In Russian)

87. *Sozinov O.V., Buzuk G.N.* 2014. Optimization of geobotanical method of points in the terms of scaling the accounting plot. – Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Estestvennye nauki. 28(17(188)): 64–69. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22411753 (In Russian)

88. *Fedorov N.I., Zhigunova S.N., Mikhailenko O.I., Samoilova L.Yu.* 2010. Methodology of estimation the efficiency of medicinal species in vegitative communities, described in the system of Brown-Blanquet ecological-floristic classification. – Izvestia of Samara Scientific Center RAS. 12(1(3)): 846–849. http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2010/2010_1_846_849.pdf (In Russian)

89. *Kubiček F.* 1976. Growth and development of *Asperula odorata* L. in an oak-hornbeam ecosystem. – Biologia. 31(1): 41–53.

90. *Walter C.A., Burnham M.B., Gilliam F.S., Peterjohn W.T.* 2015. A reference-based approach for estimating leaf area and cover in the forest herbaceous layer. – Environ. Monit. Assess. 187(10): 657. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4878-7

91. *Kercher S.M., Frieswyk C.B., Zedler J.B.* 2003. Effects of sampling teams and estimation methods on the assessment of plant cover. – J. Veg. Sci. 14(6): 899–906. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02223.x

92. *Drew W.B.* 1944. Studies on the use of the point-quadrat method of botanical analysis of mixed pasture vegetation. – J. Agric. Res. 69(7): 289–298.

93. *Greig-Smith P.* 1967. Quantitative plant ecology. Transl. from Engl. Moscow. 359 p. (In Russian)

94. *Bonham C.D., Clark D.L.* 2005. Quantification of plant cover estimates. – Grassl. Sci. 51(2): 129–137. https://doi.org/10.1111/j.1744-697X.2005.00018.x

95. *Hanley T.A.* 1978. A Comparison of the Line-Interception and Quadrat Estimation Methods of Determining Shrub Canopy Coverage. – J. Range Manage. 31(1): 60–62. https://doi.org/10.2307/3897638

96. *Gorin V.I., Savkuna S.N.* 1990. On the correlation between the projective cover and the mass of herbaceous plants. – Botanicheskii Zhurnal. 75(1): 111–115. (In Russian)

97. *Dietz H., Steinlein T.* 1996. Determination of plant species cover by means of image analysis. – J. Veg. Sci. 7(1): 131–136. https://doi.org/10.2307/3236426

98. *Floyd D.A., Anderson J.E.* 1987. A comparison of three methods for estimating plant cover. – J. Ecol. 75(1): 221–228. https://doi.org/10.2307/2260547

99. *Ganguli A.C., Vermeire L.T., Mitchell R.B., Wallace M.C.* 2000. Comparison of four nondestructive techniques for estimating standing crop in shortgrass plains. – Agron. J. 92(6): 1211–1215. https://doi.org/10.2134/agronj2000.9261211x

100. *Johnson P.S., Johnson C.L., West N.E.* 1988. Estimation of phytomass for ungrazed crested wheatgrass plants using allometric equations. – J. Range Manage. 41(5): 421–425.
https://doi.org/10.2307/3899582

101. *Frank D.A., McNaughton S.J.* 1990. Aboveground biomass estimation with the canopy intercept method: a plant growth form caveat. – Oikos 57: 57–90.
https://doi.org/10.2307/3565736

102. *Kosykh N.P., Koronatova N.G., Naumova N., Titlyanova A.A.* 2008. Above- and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems of Western Siberia. – Wetl. Ecol. Manag. 16(2): 139–153.
https://doi.org/10.1007/s11273-007-9061-7

103. *Kiljdiushevsky I.D.* 1970. A tentative method of estimating the phytomass of moss *Thuidium recognitum* (HEDW.) LINDB. Based on its height and cover. – Botanicheskii Zhurnal. 55(9): 1316–1319.
http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=2977&rid=pdf_0002968 (In Russian)

104. *Uspenskaya I.M.* 1966. The determination of the mass of moss carpet in three types of broad-leaved spruce forests in connection with their parcellar structure. – Botanicheskii Zhurnal. 51(12): 1706–1708.
http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=2619&rid=pdf_0002610 (In Russian)

105. *Vanha-Majamaa I., Salemaa M., Tuominen S., Mikkola K.* 2000. Digitized photographs in vegetation analysis – a comparison of cover estimates. – Appl. Veg. Sci. 3(1): 89–94.
https://doi.org/10.2307/1478922

106. *Richardson M.D., Karcher D.E., Purcell L.C.* 2001. Quantifying Turfgrass Cover Using Digital Image Analysis. – Crop Sci. 41(6): 1884–1888.
https://doi.org/10.2135/cropsci2001.1884

107. *Tomasel F.G., Paruelo J.M., Abras G., Ballarin V., Moler E.* 2001. A chromaticity-based technique for estimation of above-ground plant biomass. – Appl. Veg. Sci. 4(2): 207–212.
https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2001.tb00489.x

108. *Seefeldt S.S., Booth D.T.* 2006. Measuring Plant Cover in Sagebrush Steppe Rangelands: A Comparison of Methods. – Environ. Manage. 37(5): 703–711.
https://doi.org/10.1007/s00267-005-0016-6

109. *Booth D.T., Cox S.E., Meikle T., Zuuring H.R.* 2008. Ground-cover measurements: assessing correlation among aerial and ground-based methods. – Environ. Manage. 42(6): 1091–1100.
https://doi.org/10.1007/s00267-008-9110-x

110. *Gallegos Torell Å., Glimskär A.* 2009. Computer-aided calibration for visual estimation of vegetation cover. – J. Veg. Sci. 20(6): 973–983.
https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01111.x

111. *Weltz M.A., Ritchie J.C., Fox H.D.* 1994. Comparison of laser and field measurements of vegetation height and canopy cover. – Water Resour. Res. 30(5): 1311–1319.
https://doi.org/10.1029/93WR03067

112. *Kellomäki S.* 1974. On the Relation between Biomass and Coverage in Ground Vegetation of Forest Stand. – Silva Fenn. 8(1): 20–46.
https://doi.org/10.14214/sf.a14739

113. *Muukkonen P., Mäkipää R.* 2006. Empirical biomass models of understorey vegetation in boreal forests according to stand and site attributes. – Boreal Environ. Res. 11: 355–369.
http://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber11/ber11-355.pdf

114. *StatView:* StatView reference. 1999. Cary, NC, USA. 528 p.

115. *Aune E.I., Kubíček F., Moen A., Øien D.-I.* 1996. Biomass studies in semi-natural ecosystems influenced by scything at the Sølendet Nature Reserve, Central Norway. III. Tall herb birch forest. – Ekológia (Bratislava). 15(3): 307–320.

116. *Rabotnov T.A.* 1963. [To the methodology of experiments in meadows]. – Vestnik sel'skohozyajstvennoj nauki. 6: 56–68. (In Russian)

117. *Malinovsky K.A., Rabotnov T.A.* 1974. [Study of meadow biogeocenoses]. – In: [Program and methods of the biogeocoenological studies]. Moscow. P. 318-331. (In Russian)

118. *Zhulidova T.V., Kashin A.S.* 2006. [Some morphological features and resource potential of *Helichrysum arenarium* (L.) Moench in connection with growing conditions]. – Byull. Bot. Sada. Saratovskogo Gos. Universiteta. 5(1): 98–104.
https://bbs.sgu.ru/system/files_force/2017/03/ilovepdf_merged-10-98-104.pdf?download=1 (In Russian)

119. *Tausch R.J., Tueller P.T.* 1990. Foliage biomass and cover relationships between tree- and shrub-dominated communities in pinyon-juniper woodlands. – Great Basin Naturalist. 50(2): 121–134. Article 4.
https://scholarsarchive.byu.edu/gbn/vol50/iss2/4

120. *Ipomets M.A.* 1976. [Sphagnum cover productivity on the example of the Goose bog]. – In: Trudy Pechoro-Ilychskogo Gosudarstvennogo zapovednika. V. 13. Syktyvkar. P. 40–57. (In Russian)

121. *Maznaya E.A.* 2001. [Influence of industrial emissions on the state and structure of coenopopulations of *Vaccinium myrtillus* L. and *V. vitis-idaea* L. (Kola Peninsula)]. – Rastitelnye resursy. 37(3): 3–12. (In Russian)

122. *Poschlod P., Kleyer M., Jackel A.K., Dannemann A., Tackenberg O.* 2003. BIOPOP – a database of plant traits and internet application for nature conservation. – Folia Geobot. 38(3): 263–271. https://doi.org/10.1007/BF02803198

123. *Joubert A.J., Myburgh W.J.* 2014. A comparison of three dry matter forage production methods used in South Africa. – Int. J. Ecology. Article ID 314939 https://doi.org/10.1155/2014/314939

124. *Utkin A.I., Ermolova L.S., Utkina I.A.* 2008. [Surface area of forest plants: essence, parameters, use]. Moscow. 292 p. (In Russian)

125. *Zhukova L.A.* 1998. [Methods for assessing the intrapopulation biodiversity of herbaceous plants in forest ecosystems]. – In: [Proceedings of the Regional scientific and practical conf.: Modern methods of forest resources inventorying and rational use]. Yoshkar-Ola. P. 71–73. (In Russian)

126. *Tackenberg O.* 2007. A new method for non-destructive measurement of biomass, growth rates, vertical biomass distribution and dry matter content based on digital image analysis. – Ann. Bot. 99(4): 777–783. https://doi.org/10.1093/aob/mcm009

127. *Lukina N.V., Isaev N.S., Khryshen' A.M., Onuchin A.A., Sirin A.A., Gagarin Yu.N., Bartalyov S.A.* 2015. Research priorities in forest science – the basis for sustainable forest management. – Lesovedeniye. (4): 243–254. (In Russian) https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23906214